THESE

présentée

devant L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du DIPLOME DE DOCTEUR INGENIEUR
Spécialité : Génie Civil

par

Issa COULIBALY
Ingénieur E.N.I. BAMAKO-MALI

ETUDE EN FLEXION PURE DE LINTEAUX COMPOSITES CERAMIQUE - BETON ARME ROLES DE LA CERAMIQUE

1983

Soutenue le 4 juillet devant la commission d'examen :

MM. J.C. MASO	Président
C. LEGRAND	Examinateur
J.C. MALDAGUE	Examinateur
M. LORRAIN	Examinateur

UNIV.
LEIDEN

N° d'ordre : 98

THESE

présentée

devant L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du DIPLOME DE DOCTEUR INGENIEUR
Spécialité : Génie Civil

par

Issa COULIBALY
Ingénieur E.N.I. BAMAKO-MALI

ETUDE EN FLEXION PURE DE LINTEAUX COMPOSITES CERAMIQUE - BETON ARME ROLES DE LA CERAMIQUE

Soutenue le 4 juillet devant la commission d'examen :

MM. J.C. MASO ..... Président
C. LEGRAND ..... Examinateur
J.C. MALDAGUE ..... Examinateur
M. LORRAIN ..... Examinateur

COULIBALY Issa

Etude en flexion pure de linteaux composites céramique - béton armé
Rôles de la céramique. 149P

Thèse de Doctorat d'Ingénieur : Génie Civil

I.N.S.A. Toulouse 1983, n° 98

Résumé :

Ce travail avait pour but de mettre en évidence les différents rôles que peut jouer la céramique dans le comportement en flexion pure des linteaux composites céramique béton armé.
Pour ce faire deux catégories de poutres ont été testées chacune étant constituée de séries de trois poutres P1, P2 et P3 dont nous comparons les comportements. La première catégorie concernait des poutres en modèles réduits (poutres "A") tandis que la seconde était constituée de poutres en "vraie grandeur" (poutres "B").
A travers les résultats relatifs aux deux catégories de poutres "A" et "B", il est apparu que la présence de la céramique entraîne une amélioration des performances mécaniques du linteau associé et que son rôle est la résultante de deux composantes qui sont :

- une composante mécanique et
- une composante physico-chimique

MOTS CLES

Céramique, claustras, briques pour linteaux, "écorce céramique", matériaux poreux, succion capillaire, béton armé "noyau béton", céramique sèche, céramique saturée linteaux (ou poutres) composites, éprouvettes mixtes céramique-béton, état "dit" élastique, etat "dit" plastique, état fissuré, déformation, fissuration, chargement cyclique, chargement monotone, réversibilité, flèche courbure, rôle mécanique, rôle physico chimique, système mixte.

JURY et date de soutenance : 4 Juillet 1983

Président : Mr MASO Jean Claude
Membres MM LEGRAND CLAUDE
MALDAGUE Jean-Claude)
LORRAIN Michel

Laboratoire de Génie Civil I.N.S.A.

Dépot à la BU : 64 exemplaires

Ce travail a été effectué dans les Laboratoires du Département de Génie Civil de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre plus profonde gratitude à Monsieur le Professeur Lorrain, Directeur du Département de Génie Civil, qui a assuré la direction de notre travail et dont les précieux conseils tant au stade de l'expérimentation qu'au stade de la rédaction de ce mémoire, nous ont jamais fait défaut du début jusqu'à la fin. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance pour la bienveillance dont il nous a fait preuve.

Que Monsieur Arnaud, Maître Assistant au Département de Génie Civil de l'Institut Universitaire de Technologie de Toulouse, trouve également dans cette circonstance les remerciements combien méritoires ! pour les conseils continuels qu'il nous a prodigués tout le long de l'élaboration de cette thèse.

Monsieur le Professeur Maso, Responsable de la Formation de Recherche du Département de Génie Civil de l'Institut National des Sciences Appliquées et Monsieur le Professeur LEGRAND Directeur du Laboratoire de Génie Civil de l'I.N.S.A. de Toulouse nous ont fait l'honneur d'accepter de faire partie de notre jury et de nous faire part de leurs précieuses observations. Nous leur en exprimons notre profonde gratitude.

Monsieur Maldague, Directeur Général de la Recherche à l'Union Technique Interprofessionnelle du Bâtiment et des Travaux Publics, a bien voulu faire partie de notre jury. Nous mesurons l'honneur qu'il nous fait ainsi et l'en remercions très sincèrement.

Enfin que tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à l'élaboration de cette thèse trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I : TECHNIQUE EXPERIMENTALE

I.1. PROGRAMME DES ESSAIS

I.1.1. Objectifs du programme
I.1.2. Définition des poutres d'essais
I.1.3. Définition des programmes de chargement
I.1.4. Définition des programmes de mesure.

I.2. DISPOSITIFS DE MISE EN CHARGE ET DE MESURE

I.2.1. Dispositifs de mise en charge
I.2.2. Dispositifs de mesure
I.2.2.1. Mesure des flèches
I.2.2.2. Mesure des déformations
I.2.2.3. Détection des fissures
I.2.2.4. Centralisation des mesures

I.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

I.3.1. Béton
I.3.1.1. Composition
I.3.1.2. Essais de contrôle

I.3.2. Céramique
I.3.2.1. Essais de traction
I.3.2.2. Essais de compression

I.3.3. Aciers

I.3.4. Association céramique-béton

I.3.4.1. Essais d'adhérence

I.3.4.2. Essais de contrôle

I.4. FABRICATION DES POUTRES D'ESSAIS

I.4.1. Poutres à échelle réduite ou poutres "A"

I.4.1.1. Coffrages

I.4.1.2. Appareillage de vibration

I.4.1.3. Conservation

I.4.2. Poutres "en vraie grandeur" ou poutres "B"

I.4.2.1. Coffrages

I.4.2.2. Appareillage de vibration

I.4.2.3. Conservation

CHAPITRE II : RESULTATS POUTRES "A"

II.1. ALLURE CARACTERISTIQUE DES COURBES OBTENUES

II.1.1. Lois : Moment-flèche et moment courbure

II.1.1.1. Comportement des poutres dans la zone "dite" élastique (OA).

II.1.1.2. Comportement des poutres dans la zone fissurée (BC)

II.1.1.3. Comportement des poutres dans la zone "dite" plastique (DE)

II.1.2. Déformations de la face supérieure comprimée des noyaux béton

II.2. COMPORTEMENT DES POUTRES AUX ETATS LIMITES D'UTILISATION

II.2.1. Définition du moment de service expérimental
II.2.2. Comportement des poutres aux états limites d'utilisation.
II.2.2.1. Etat limite de déformation
II.2.2.2. Etat limite de réversibilité

II.3. COMPORTEMENT DES POUTRES A LA RUPTURE

II.3.1. Moments de rupture expérimentaux Mr
II.3.2. Calcul du moment de rupture de la poutre composite P1

II.4. CONCLUSIONS

CHAPITRE III : RESULTATS POUTRES "B"

III.1. ALLURE CARACTETISTIQUE DES COURBES OBTENUES

III.1.1. Lois : Moment - flèche et moment-courbure

III.1.1.1. Comportement des poutres dans la zone "dite" élastique (AO)
III.1.1.2. Comportement des poutres dans la zone fissurée (BC)
III.1.1.3. Comportement des poutres dans la zone "dite" plastique (DE).

III.1.2. Déformations de la face supérieure comprimée des noyaux béton

III.2. COMPORTEMENT DES POUTRES AUX ETATS LIMITES D'UTILISATION

III.2.1. Moment de service expérimental
III.2.2. Comportement des poutres aux états limites d'utilisation
III.2.2.1. Etat limite de déformation
III.2.2.2. Etat limite de réversibilité

III.3. COMPORTEMENT DES POUTRES A LA RUPTURE

III.3.1. Moments de rupture expérimentaux Mr
III.3.2. Calcul du moment de rupture de la poutre composite P1

III.4. CONCLUSIONS

CHAPITRE IV : EFFETS EN PRESENCE-INTERPRETATION

IV.1. EFFET MECANIQUE
IV.2. EFFET PHYSICO-CHIMIQUE
IV.3. CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

Les impératifs techniques de continuité d'isolant ou d'homogénéité de processus de construction ont conduit de nos jours à une utilisation très courante d'éléments de structure mixtes associant des éléments de maçonnerie destinés à recevoir de l'isolant (blocs creux de mortier ou de terre cuite) à du béton, armé ou non, ce béton pouvant être traditionnel, léger ou expansé.

Quelques exemples de ces éléments mixtes de structure sont les linteaux qui constituent la partie supérieure des baies et les chaînages verticaux de la jointure des murs, pour ne citer que ceux-là.

Ces éléments mixtes sont réalisés au moyen de briques pour linteaux ou de briques d'angle spécialement conçues pour recevoir un "noyau" de béton pour lequel elles servent de coffrage "définitif" (figures I.1 et I.2).

De tels éléments de structure composites ont fait l'objet de diverses études qui portaient notamment sur des poteaux (1), des linteaux (2) et même sur des murs (3). Ces études, si elles ont permis de mettre au point des méthodes de calcul semi-empiriques ou empiriques plus ou moins adaptées aux structures mixtes (2), (4) se bornaient uniquement à une appréciation de performance d'ensemble et ne mettaient donc pas en évidence les rôles respectifs des matériaux constitutifs (béton et corps creux poreux) ainsi que leurs interactions.

Ces interactions peuvent revêtir une importance significative si l'on se réfère par exemple aux travaux de Grandet sur la prise et l'hydratation des mortiers au contact des matériaux poreux (5), qui ont mis en évidence le rôle favorable de la succion capillaire de ces derniers sur leur liaison avec le mortier d'enduit, et aussi l'importance primordiale de la succion du matériau poreux sur le durcissement du mortier en contact.

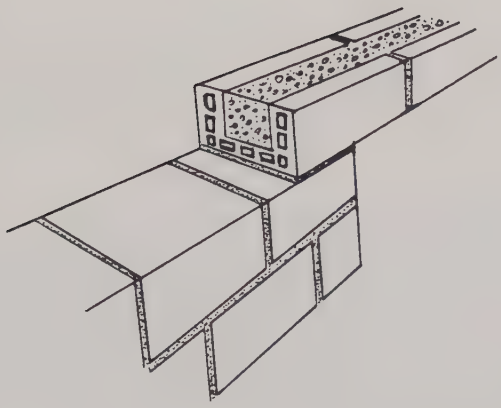


FIGURE: I-1 BRIQUES POUR LINTEAUX.

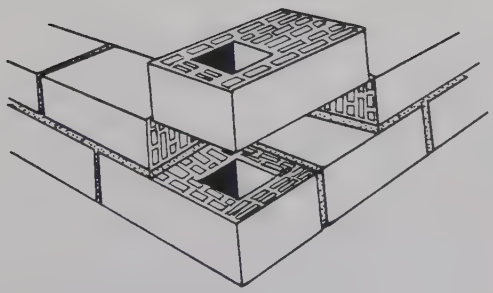


FIGURE: I-2 BRIQUES D'ANGLE

Ces phénomènes peuvent conduire à se demander ce que peut être l'importance de l'influence de la succion capillaire sur le comportement mécanique du "noyau" béton des éléments de structure composites, donc sur la sécurité de l'ensemble de structure associée.

La méconnaissance de ces aspects fondamentaux est une entrave à la conception rationnelle de systèmes mixtes nouveaux dont on ne peut pas prévoir les performances si on ne sait pas quels sont les mécanismes de fonctionnement.

Dans ce mémoire de thèse nous nous proposons d'aborder ces aspects fondamentaux d'analyse des comportements des constituants et de leur association pour contribuer à une méilleure connaissance des performances globales de ces systèmes mixtes.

Pour ce faire, nous avons choisi de travailler sur les linteaux qui présentent l'intérêt d'être des éléments simples du point de vue des sollicitations qui s'y appliquent : flexion simple avec uniaxialité du champ de contrainte.

Pour pouvoir étudier les phénomènes en présence sur un grand nombre d'essais, nous avons opéré dans un premier temps sur des poutres en "modèles réduits". Et afin de saisir les différents effets susceptibles d'intervenir, nous avons soumis à la flexion, à chaque manipulation, une série de trois poutres P1, P2 et P3 issues d'une même gâchée de béton et identiquement armées :

- P1 est une poutre composite céramique - béton - armé ;
- P2 est une poutre constituée du "noyau" béton d'une poutre composite désolidarisée de son "écorce céramique",
- P3 est un "noyau" de béton seul coulé à part dans un coffrage étanche ordinaire.

Nous avons choisi ces caractéristiques de constitution et (ou) de fabrication de manière à ce que le rôle mécanique de la céramique soit matérialisé par la différence de comportement entre P1 et P2, et que le rôle physico-chimique soit mis en évidence par les écarts entre P2 et P3.

Dans un deuxième temps et suivant le même schéma que précédemment (poutres en "modèles réduits") nous avons effectué quelques essais de pièces en "vraie grandeur" pour vérifier si les résultats obtenus sur la catégorie de poutres précitée le sont également sur cette deuxième catégorie et pour tenir compte d'un éventuel effet d'échelle.

Les pièces ont été essayées à quatorze jours d'âge pour la première catégorie ("modèles réduits") et vingt huit jours d'âge pour la deuxième ("vraie grandeur") ces délais nous ayant été imposés par la nécessité de pouvoir faire suffisamment d'essais dans un temps relativement limité et par la durée nécessaire à la préparation des manipulations.

Le chargement était effectué de façon continûment croissante jusqu'à rupture exception faite des cas où nous avons effectué des retours à "zéro" sur la base d'une précharge de 50 daN, pour estimer les degrés de réversibilité des pièces.

Les mesures effectuées étaient les mêmes pour chacune des poutres P1, P2 et P3 de la série testée et, ont porté sur les déformations et les déplacements en partie centrale la plus sollicitée exempte des effets de l'effort tranchant (flexion pure).

Ce mémoire se présente en quatre chapitres dont le premier est consacré à l'exposé détaillé des caractéristiques des poutres d'essais ("modèles réduits" et "vraie grandeur") ainsi qu'à celui de la procédure expérimentale.

Le deuxième chapitre concerne la présentation des résultats expérimentaux relatifs aux poutrelles ou linteaux en "modèles réduits".

Le troisième chapitre est consacré à la vérification des phénomènes observés sur les linteaux en "modèles réduits", sur ceux en "vraie grandeur".

Enfin dans le quatrième et dernier chapitre nous analysons et interprétons les résultats exposés dans les deux chapitres précédents en mettant en évidence les rôles mécanique et physico-chimique de la céramique sur le comportement en flexion pure des linteaux composites correspondants.

NB : Au cours de notre exposé, nous utiliserons indistinctement les termes "linteau" et "poutre" le premier n'étant qu'un cas particulier du second.

CHAPITRE I

TECHNIQUE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I

METHODE EXPERIMENTALE

Ce premier chapitre est consacré à la présentation de la méthode expérimentale que nous avons suivie :

- Le premier paragraphe traite du programme des essais, où nous donnons un exposé détaillé des objectifs que nous nous sommes fixés, les définitions des poutres d'essais avec leurs caractéristiques dimensionnelles ainsi que les programmes de chargement et de mesure ;
- le second paragraphe décrit les dispositifs de mise en charge et de mesure ;
- le troisième paragraphe traite des caractéristiques des matériaux utilisés ;
- enfin le quatrième et dernier paragraphe concerne la fabrication des poutres d'essais.

I.1. PROGRAMME DES ESSAIS

I.1.1. Objectifs du programme

Les poutres sur lesquelles ont porté les essais sont divisées en deux catégories pour les raisons évoquées précédemment. La première catégorie concerne des poutrelles (modèles réduits) tandis que la seconde est constituée de poutres de dimensions normales (vraie grandeur). Dans la suite de notre mémoire, nous désignerons la première catégorie par l'appellation "poutres A" et la seconde par l'appellation "poutres B".

Pendant l'expérimentation, nous avons effectué les mêmes types de mesures, flèches centrales et déformations sur chacune des poutres essayées, dans le cas des poutres "A" comme dans celui des poutres "B". Ces mesures nous permettent de procéder à une étude comparative des comportements en flexion pure des poutres de la série testée, d'une part "en service" et d'autre part "à la rupture". Cette analyse nous permettra ensuite de dégager les rôles de la céramique sur les différents niveaux d'état limite (déformation, réversibilité, rupture). Enfin la comparaison des résultats des deux catégories de poutres "A" et "B" nous permettra de noter s'il y a un éventuel effet d'échelle.

I.1.2. Définition des poutres d'essai

Pour chacune des deux catégories de poutres sus-mentionnées les essais ont porté à chaque fois sur une série de trois poutres P1, P2 et P3 qui se définissent comme suit :

- P1 : poutre composite céramique béton armé obtenue en coulant du béton dans un coffrage "définitif" de céramique ;
- P2 : poutre en béton armé uniquement que nous appellerons "noyau BA", obtenue par sciage de l'"écorce céramique" après durcissement d'une poutre à section composite ;
- enfin P3, une deuxième poutre en béton-armé uniquement que nous obtenons en coulant directement le béton dans un coffrage étanche ordinaire ayant les dimensions du "noyau B.A." de la poutre composite P1.

Bien entendu toutes les poutres sont issues d'un béton d'une même gachée et, ont le même âge à la date de l'essai soit quatorze jours pour les poutres "A" (modèles réduits) et vingt huit jours pour les poutres "B" (vraie grandeur).

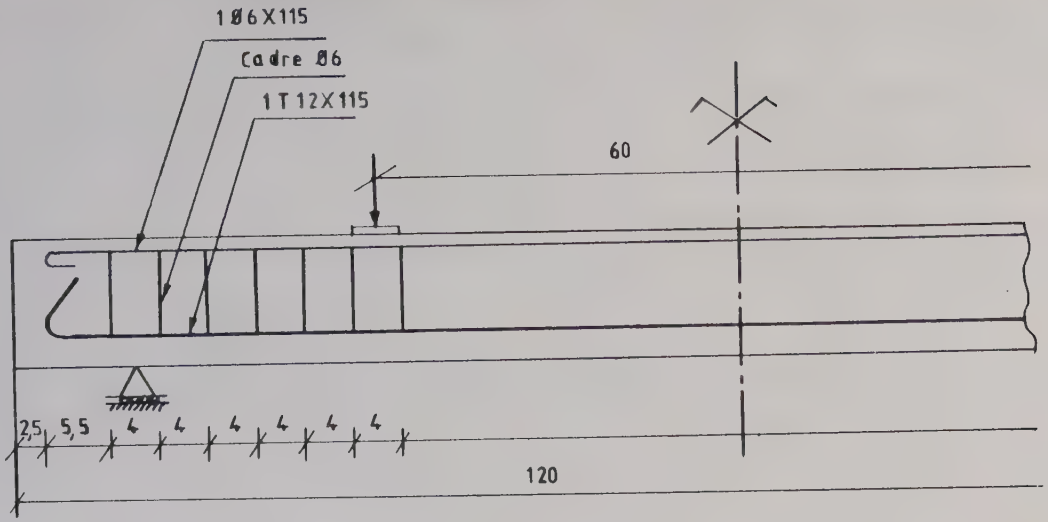
Le ferraillage est identique pour les trois poutres P1, P2, et P3, en particulier la section des aciers tendus calculée pour le "noyau BA", est telle que théoriquement le moment de rupture soit le même pour toutes les poutres.
Les figures I.3 et I.4 schématisent les sections des différentes poutres ainsi que les ferraillages correspondants.

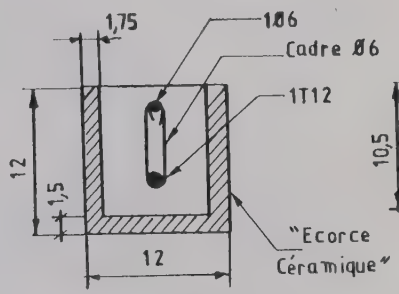
I.1.3. Définition des programmes de chargement

Les poutres constituant les corps d'épreuve sont soumises à des charges successives croissantes jusqu'à la rupture. Pour estimer les degrés de réversibilité de la flèche et des déformations, nous avons effectué également des cycles de chargement d'amplitude continûment croissante avec retour à un niveau de précharge de 50 daN, dans un certain nombre de cas. Les tableaux I.1 et I.2 illustrent les programmes de chargement pour les poutres "A" (modèles réduits) tandis que les tableaux I.3 et I.4 représentent ceux des poutres "B" (vraie grandeur). De plus il nous a semblé opportun d'illustrer graphiquement les prograjmes de chargement cyclique (tableaux I.2 et I.4) sur les figures I.5 et I.6 (le chargement est effectué à vitesse de déformation imposée, les paliers de retour étant réalisés à charge fixée d'avance).

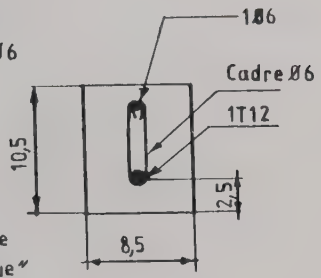
Nous avons adopté pour tous les deux types de chargement (monotone et cyclique) le mode d'asservissement "en déformation" qui présente l'avantage sur celui "en force" de limiter les effets du fluage pendant le temps nécessaire à l'enregistrement des diverses mesures et de permettre la maîtrise de la phase ultime de l'essai compte tenu notamment du caractère fragile de la céramique.

FIGURE I-3: FERRAILLAGE DES POUTRES "A"

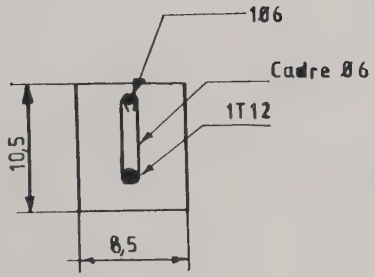




POUTRE COMPOSITE: P1

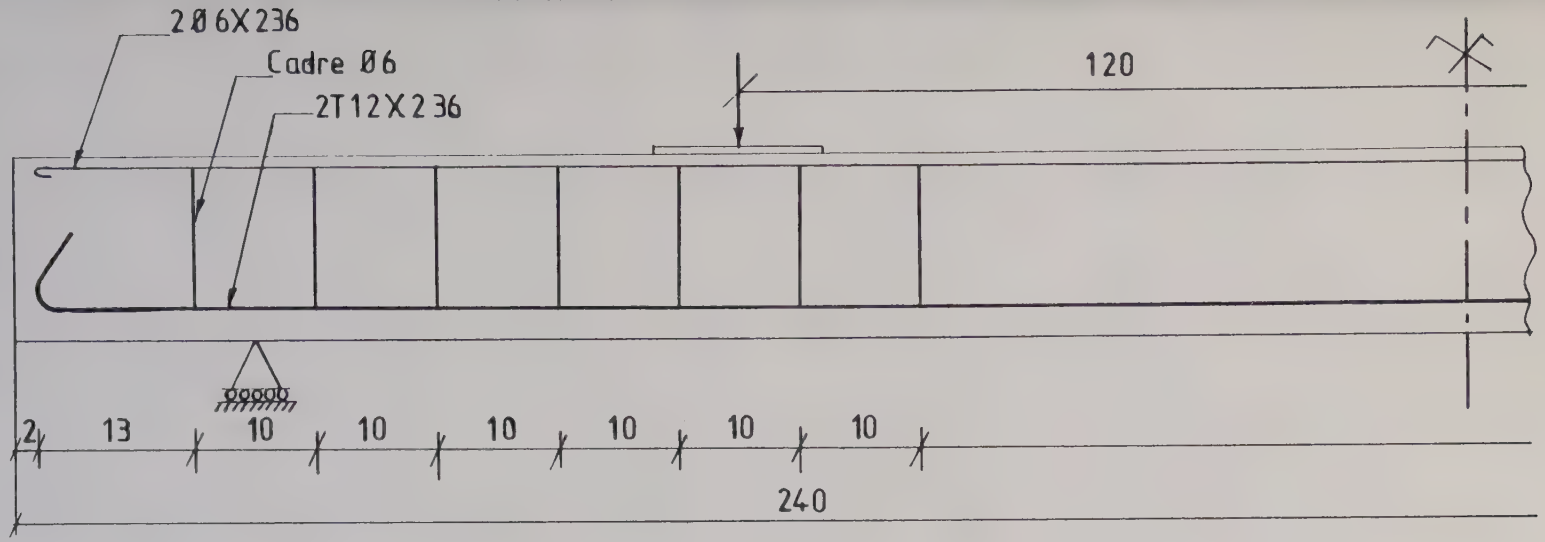


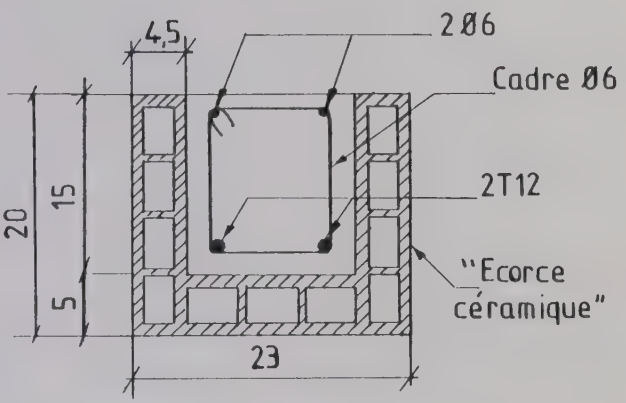
"NOYAU BA" P2



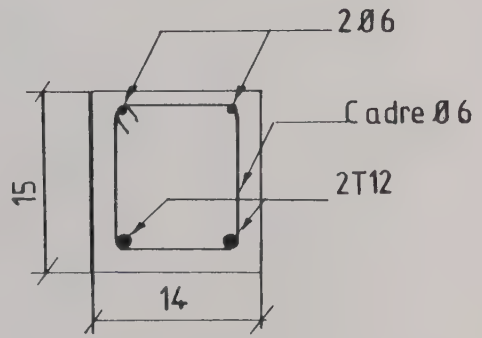
"NOYAU BA" P3

FIGURE I-4 FERRAILLAGE DES POUTRES "B"

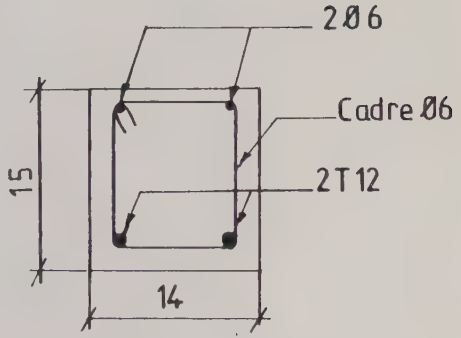




POUTRE COMPOSITE: P1



"NOYAU BA": P2



"NOYAU BA": P3

La vitesse de chargement est de 0,42 mm/mn dans tous les cas, elle correspond à une augmentation de contrainte de la fibre supérieure de 8 KPa/s pour les poutres "A" et de 10KPa/s pour les poutres "B", au départ de l'essai. Ces valeurs sont bien en accord avec la recommandation d'une norme qui stipule que pour des essais de poutres en béton armé l'augmentation de contrainte du béton ne devrait pas dépasser 50 KPa/s en régime élastique.

CHARGEMENTS DES POUTRES "A"			
Etape de Chargement	Paliers de chargement en daN	Paliers de mesure en daN	Durée sur chaque palier
1	De 200 en 200 jusqu'à 4 000	De 200 en 200 jusqu'à 4 000	15 s environ
2	De 100 en 100 entre 400 et la charge de rupture	De 100 en 100 entre 4 000 et la charge de rupture	15 s environ.

Tableau I.1.

	CHARGEMENTS DES POUTRES "A"		
N° Chargement	Charges minimales et maximales en daN	Paliers de mesure en daN	Durée sur chaque palier
1	0 à 500	de 100 en 100	15 s environ
2	0 à 1000	100 en 100	"
3	0 à 1500	"	"
4	0 à 2000	"	"
5	0 à 2500	"	"
6	0 à 3000	"	"
7	0 à 3200	de 50 en 50	"
8 (1)	0 à 3400	"	"
9	0 à 3600	"	"
10	0 à 3800	"	"
11	0 à 4000	"	"
12 (2)	0 à 4200	"	"
13	0 à la rupture	En fonction des accroissements de la flèche	

Tableau I.2

CHARGEMENTS DES POUTRES "B"		
Paliers de chargement en daN	Paliers de mesure en daN	Durée sur chaque palier
De 200 en 200 jusqu'à la rupture	De 200 en 200 jusqu'au voisinage de la rupture	20 s environ

Tableau I.3
(1) 0 à la rupture (2) 0 à la rupture

CHARGEMENTS DES POUTRES "B"			
N° Chargement	Charges minimales et maximales en daN	Paliers de mesure en daN	Durée sur chaque palier
1	0 à 1 000	de 200 en 200	20 s environ
2	0 à 2 000	"	"
3	0 à 3 000	"	"
4	0 à 4 000	"	"
5	0 à 5 000	"	"
6	0 à la rupture	En fonction des accroissements de la flèche	

Tableau I.4

I.1.4. Définition des programmes de mesure

A chaque manipulation nous avons mesuré pour les trois poutres P1, P2, et P3 la flèche centrale, le raccourcissement relatif de la fibre supérieure du béton, le raccoursiccement relatif de la fibre supérieure de la céramique, l'allongement relatif transversal en face comprimée du béton et l'allongement relatif au niveau de la fibre inférieure du béton, dans la zone de moment constant (soumise à la flexion pure).

Toutes ces valeurs nous permettront de déterminer les déformations d'ensemble, les déformations locales des matériaux et les courbures des poutres.

Les points de mesure choisis sont indiqués sur les figures I.7 à I.10.

FIGURE I-5: CHARGEMENT CYCLIQUE DES POUTRES "A"

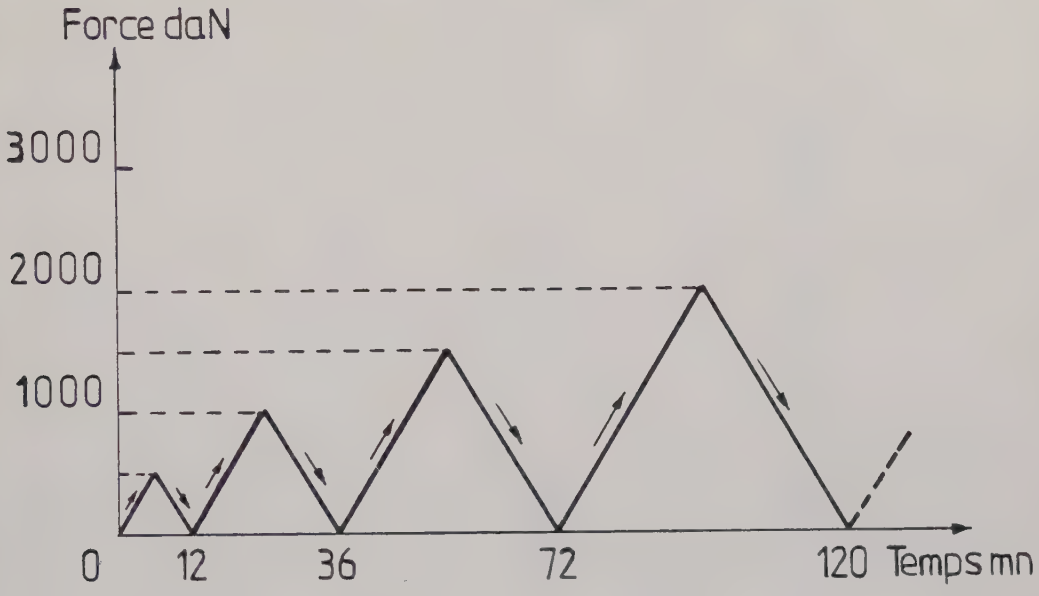
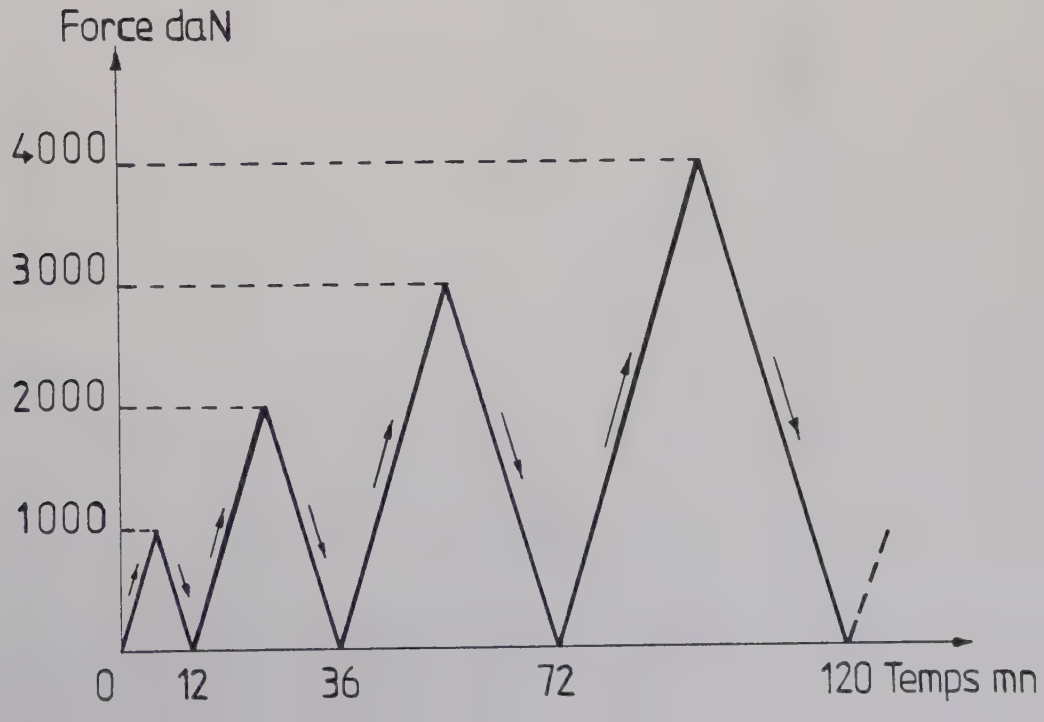


FIGURE I-6: CHARGEMENT CYCLYQUE DES POUTRES "B"



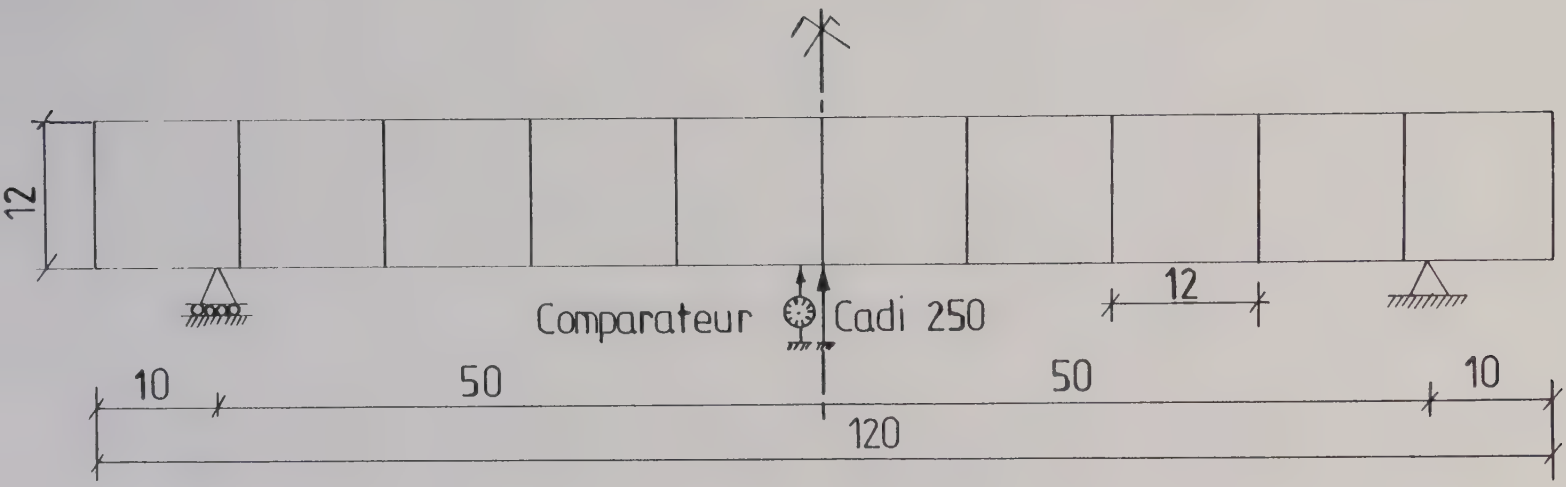


FIGURE I-7 POUTRES "A"_POSITIONS DU CAPTEUR ET DU COMPARATEUR DE MESURE DE LA FLECHE

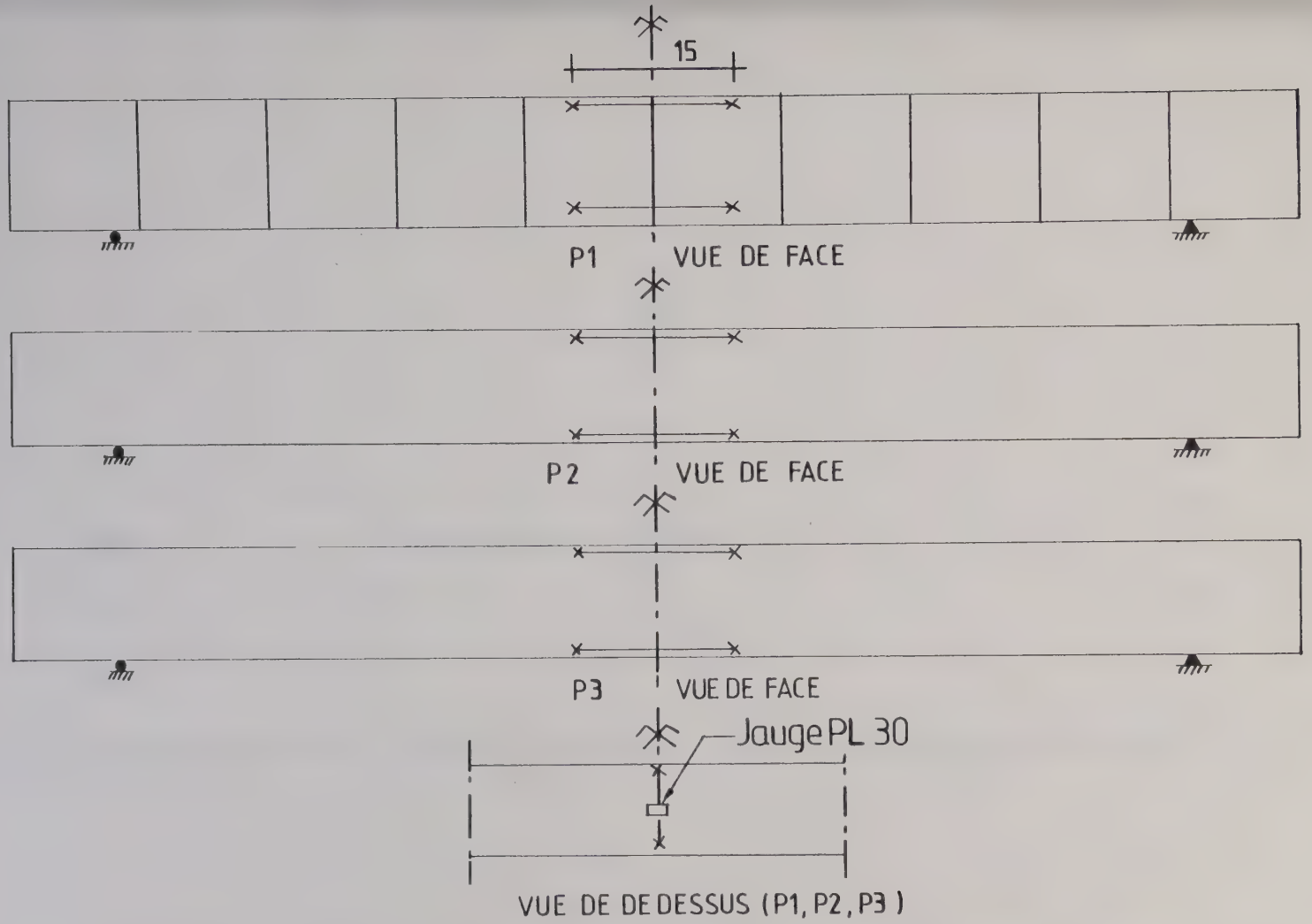


FIGURE I-8 POUTRES "A" - POSITIONS DES CAPTEURS DE DEFORMATION

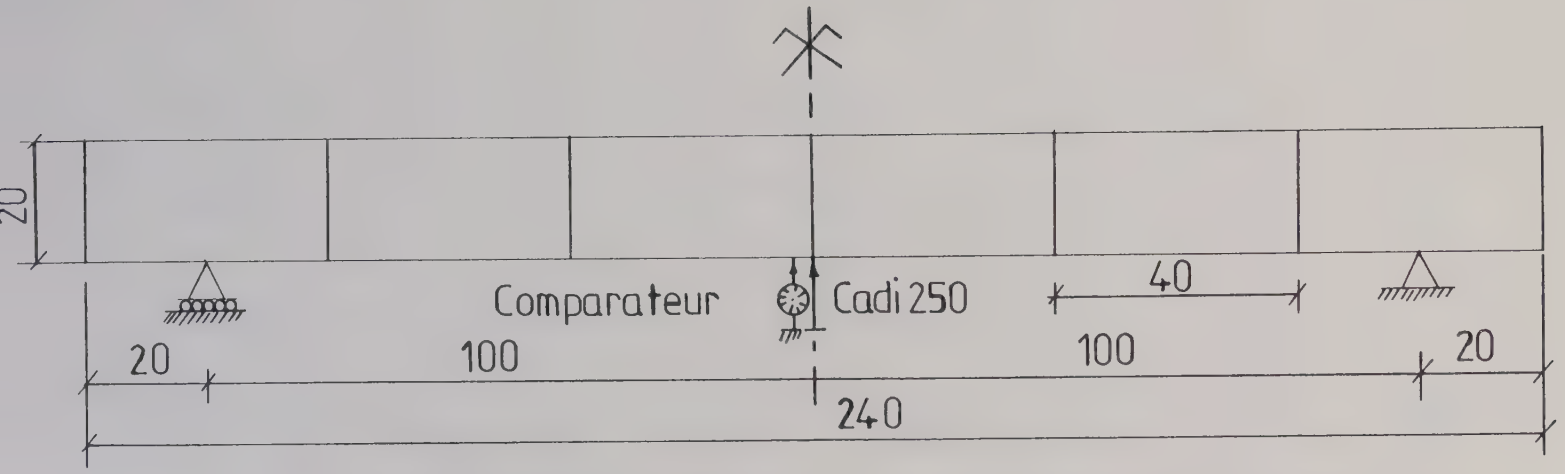


FIGURE I-9: POUTRES "B" - POSITIONS DU CAPTEUR ET DU COMPARATEUR DE MESURE DE LA FLECHE

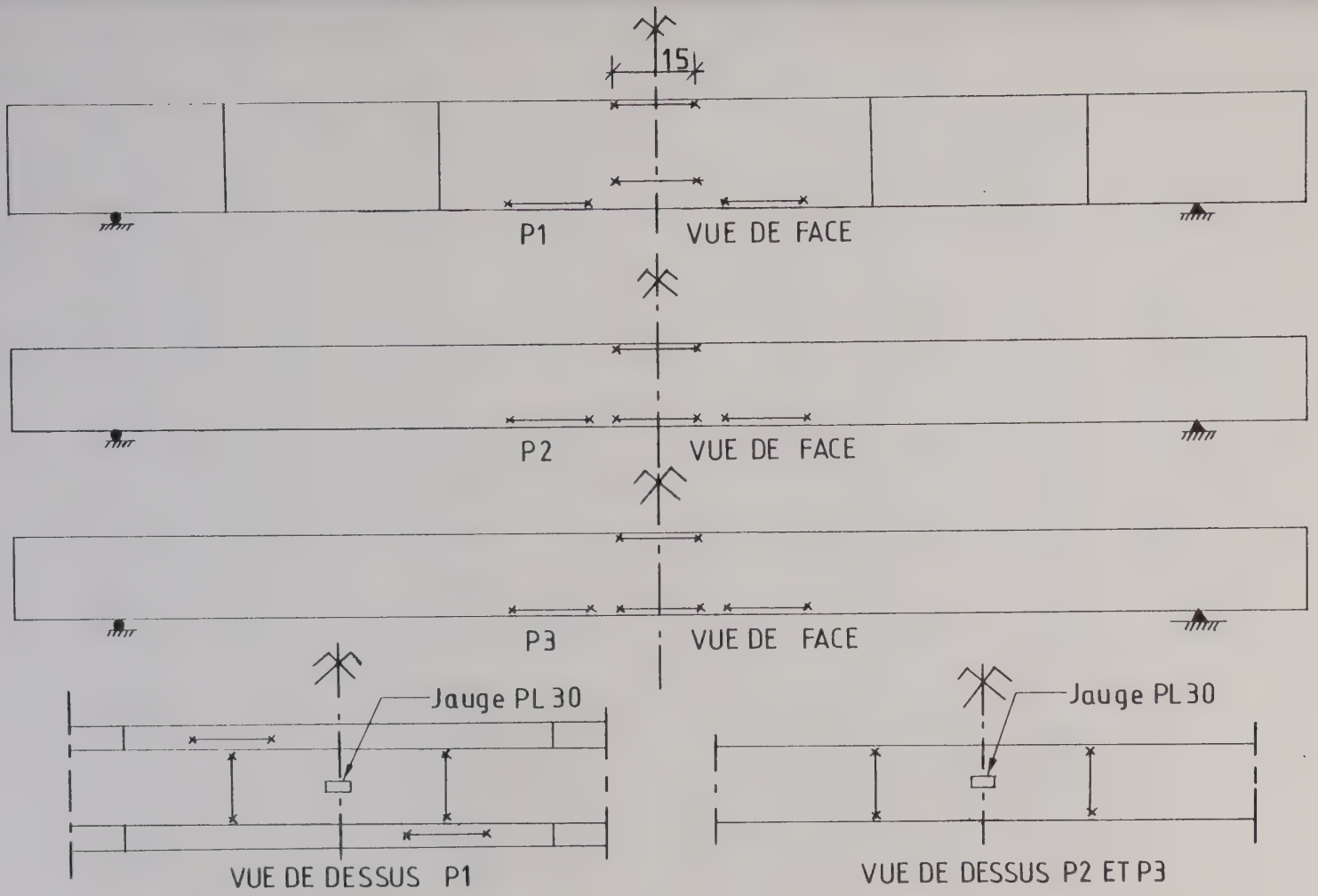


FIGURE I-10 : POUTRES "B" - POSITIONS DES CAPTEURS DE DEFORMATION

I.2. DISPOSITIFS DE MISE EN CHARGE ET DE MESURE

I.2.1. Dispositif de mise en charge

Nous avons adopté le système de chargement bien connu dit de "flexion quatre points". Le dispositif utilisé est schématisé sur les figures I.11 et I.12 pour les poutres "A" et "B" respectivement.

Le banc de flexion (fig. I.13) est équipé d'un vérin dont on peut choisir la valeur maximale de la force développée. Au cours des essais nous avons adopté l'échelle de 100 KN maxi pour les poutres "A" et celle de 200 KN maxi pour les poutres "B", ceci compte tenu des charges de ruine théoriques respectives des corps d'épreuve des deux catégories.

La force développée dans le vérin est transmise à la poutre par l'intermédiaire d'un palonnier aux appuis articulés (Fig. I.15). Les appuis de la poutre sont également articulés de manière à permettre la déformation de rotation de la pièce. L'un des appuis du palonnier utilisé pour les poutres "B" permet en plus, un déplacement longitudinal à l'aide d'un système de rouleaux.

Enfin la commande du vérin est assurée par un groupe de pilotage automatique permettant de choisir entre les modes d'asservissement "en force" et "en déformation" (fig.I.14).

I.2.2. Dispositifs de mesure

I.2.2.1. Mesure de la flèche

Pour chacune des poutres de la série testée nous avons mesuré la flèche à mi-portée à l'aide d'un capteur de déplacement à variation d'inductance ayant une course de $\pm$ 25 mm (cadi 250).

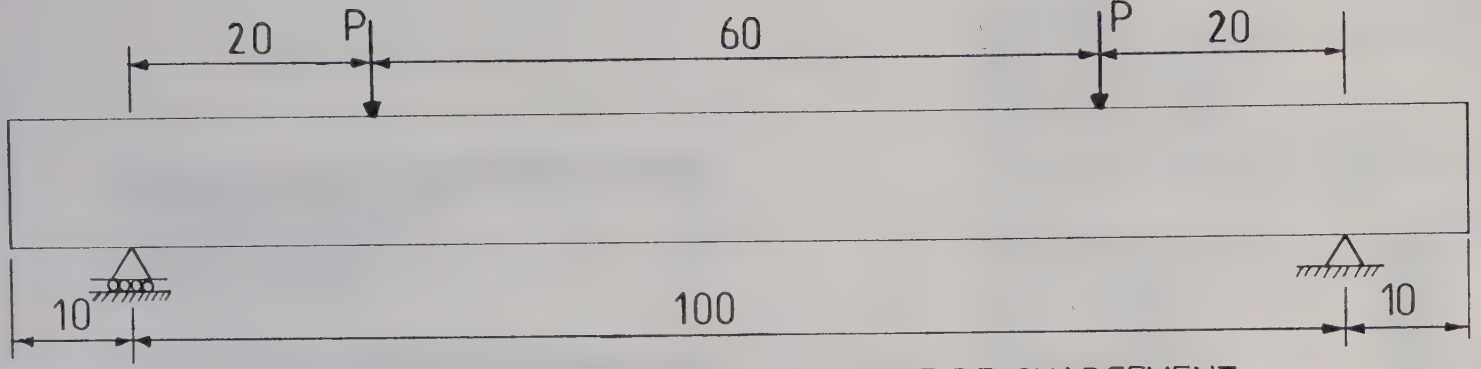


FIGURE I-11: POUTRES "A" - SYSTEME DE CHARGEMENT

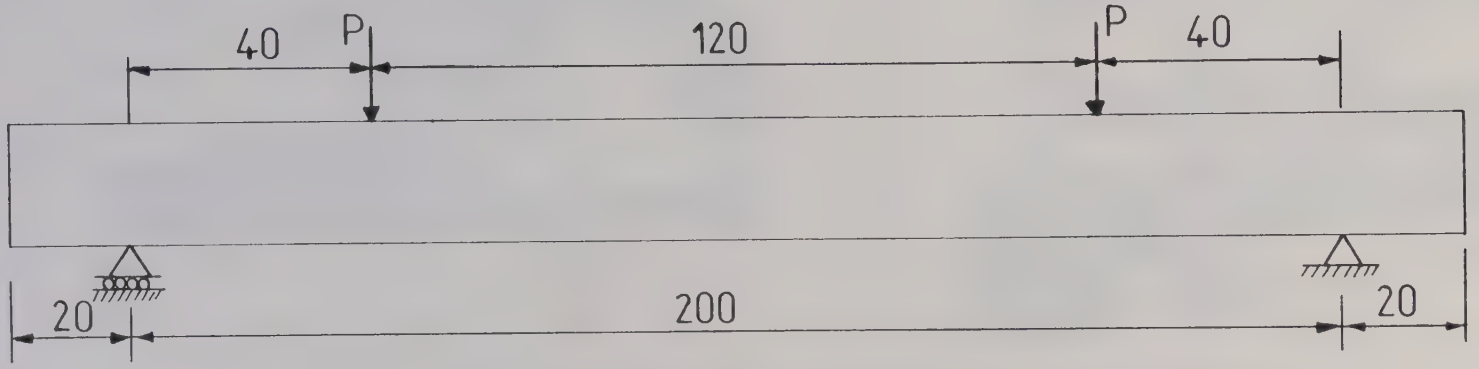


FIGURE I-12: POUTRES "B" - SYSTEME DE CHARGEMENT

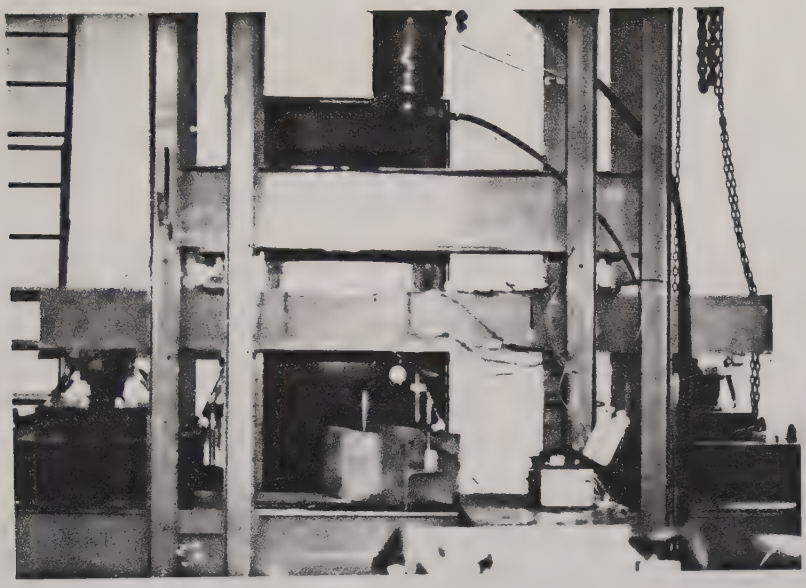


FIGURE I-13 : BANC DE FLEXION

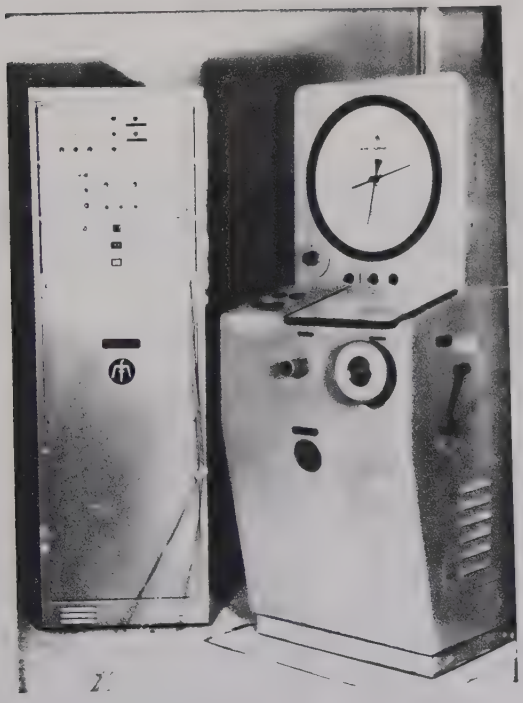


FIGURE I-14 : PILOTAGE AUTOMATIQUE DU VERIN

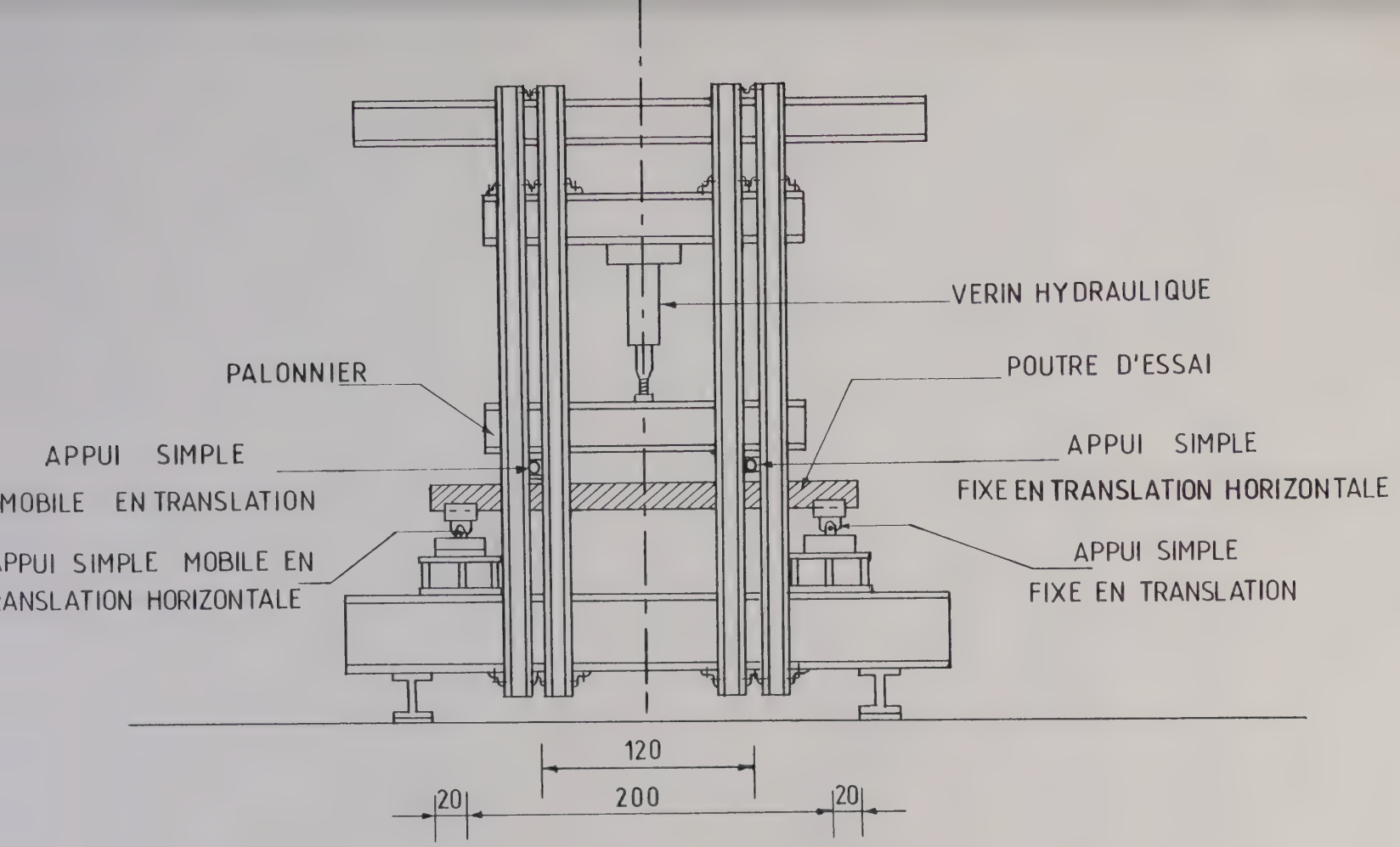


FIGURE I-15 : BANC DE FLEXION

En connectant ce capteur de déplacement à une table traçante nous avons pu suivre graphiquement l'évolution de la flèche en fonction de la charge appliquée

Afin de pouvoir contrôler les valeurs de la flèche par lecture directe aux diffférents paliers de chargement, nous avons associé au capteur un comparateur gradué au dixième de mm.

I.2.2.2. Mesure des déformations

Les déformations ont été mesurées d'une part à l'aide d'une jauge PL30 pour le raccourcissement de la fibre supérieure du "noyau B.A." et d'autre part à l'aide de capteurs du même type que précédemment mais ayant une course plus petite, de ± 1 mm (cadi 10) pour les autres cas. Ces capteurs sont fixés au moyen de deux plots filetés collés sur la pièce.L'un des plots sert de support à une butée réglable tandis que l'autre reçoit une douille dans laquelle le capteur est introduit. La base de mesure est de la largeur du "noyau BA" pour la mesure de l'extension transversale et de 15 cm pour tout le reste.

I.2.2.3. Détection des fissures

La détection des fissures est effectuée à l'aide d'une loupe binoculaire à fort grossissement. Ceci nous permet de relever les charges de fissuration respectives des différentes poutres, la fissuration se manifestant par ailleurs par un changement brusque dans la réponse des capteurs comme d'autres chercheurs l'ont d'ailleurs constaté (6).

1.2.2.4. Centralisation des mesures

La figure I.16 représente la chaîne de centralisation de l'ensemble des mesures de déformation.
Ce dispositif comprend les éléments ci-après :

- un voltmètre intégrateur ;
- un scanner auquel sont reliés tous les capteurs ;
- un calculateur de type PDP - 8 ;
- un télétype connecté au calculateur et permettant la commande de la chaîne de mesure.

A chaque palier de chargement les mesures sont déclenchées manuellement à partir du télétype et la totalité des opérations dure environ 15 secondes.

1.3. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

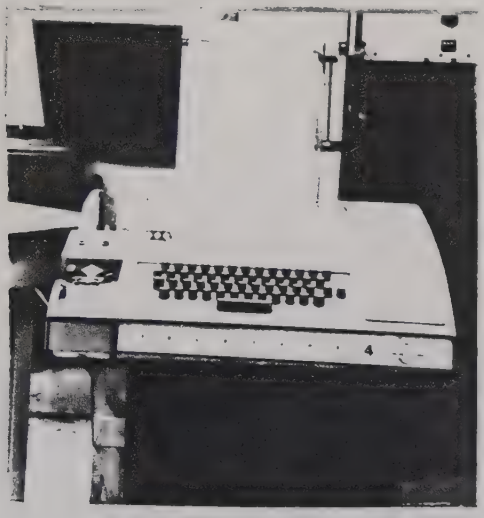
I.3.1. Béton

I.3.1.1. Composition

Les deux catégories de poutres "A" et "B" ont été fabriquées avec un béton de composition courante utilisée dans notre laboratoire. Cette composition définie par la méthode de Dreux (7) est donnée dans les tableaux I.5 et I.6).

La courbe granulométrique de référence (ciment non compris) des granulats concassés (marbre de St Béat) que nous avons utilisés est représentée sur la figure I.17.

VOLTMETRE ET SCANNER



TELETYPE

FIGURE I-16 : CHAÎNE DE CENTRALISATION DES MESURES

Ciment CPJ 45 R	400 Kg/m3	
Eau	240 Kg/m3	= 0,6)
Granulats concassés de calcite (St Béat)	1824 Kg/m3	

Tableau I.5

COMPOSITION GRANULOMETRIQUE (Ciment non compris)							
Classe (mm passoire)	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,8	0,8-1,6	1,6-3,15	3,15-8	8-1,6
Pourcentage (%)	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	9,50	54
Quantité (Kg)	133	133	133	133	133	173	986

Tableau I.6

I.3.1.2. Essais de contrôle

Pour contrôler la qualité du béton utilisé et déterminer sa résistance en compression, nous avons confectionné trois éprouvettes cyclindriques normalisées lors de la fabrication de chaque série de poutres. Ces éprouvettes sont de 200 cm2 de section et de 32 cm de hauteur. Les contraintes moyennes de compression à 14 jours et 28 jours d'âge obtenues sont indiquées dans le tableau I.7

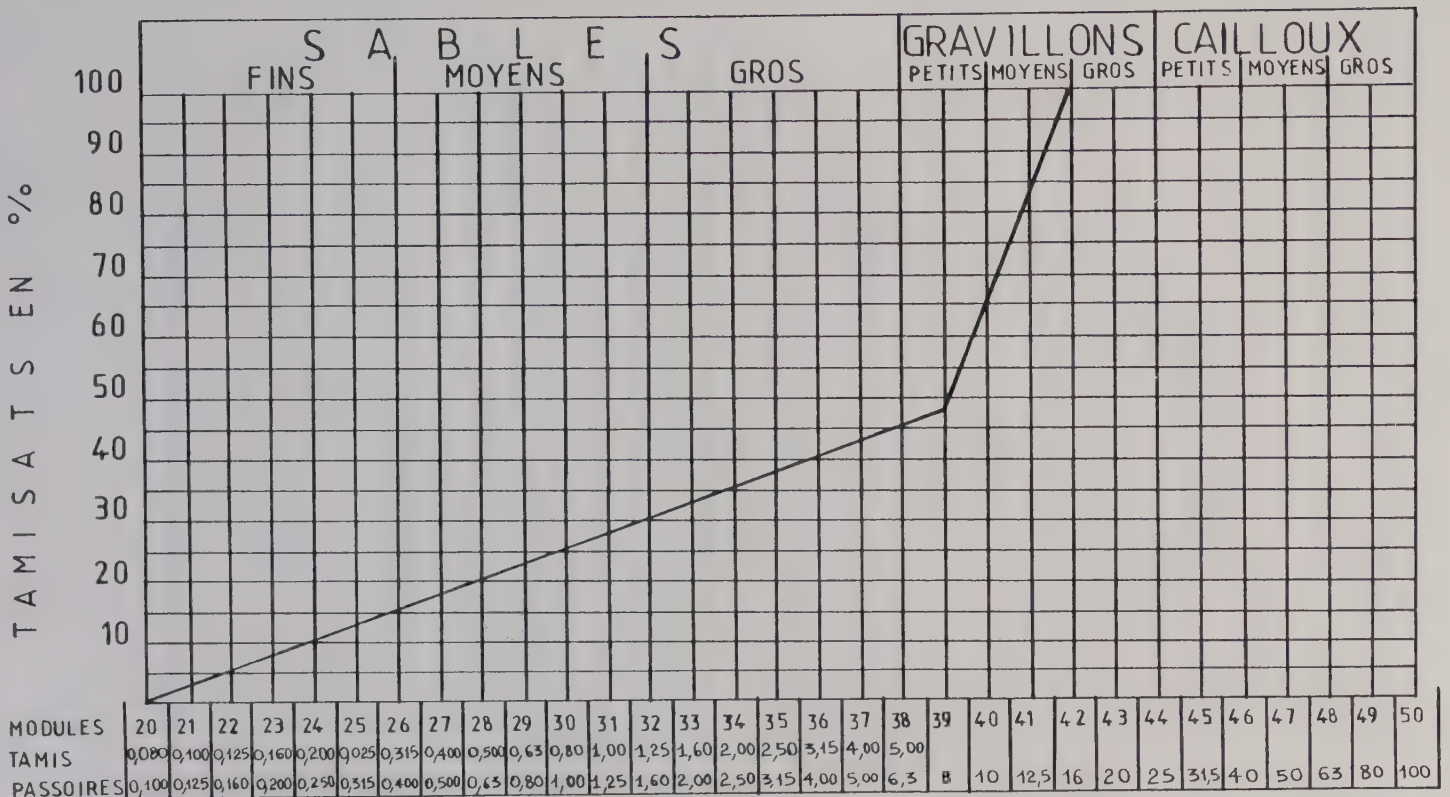


FIGURE I-17: COURBE GRANULOMETRIQUE DE REFERENCE DU BETON

Nous n'avons pas observé d'écarts importants entre les résistances des différentes éprouvettes (± 8% maxi)

Contraintes moyennes de compression en daN/cm2)	
$\sigma'_{14\,j}$	$\sigma'_{28\,j}$
220	280

Tableau I.7

I.3.2. Céramique

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de la céramique utilisée, qui nous serviront éventuellement dans les calculs et comme référence, nous avons effectué des essais de traction et de compression sur de petites éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes sont obtenues par carrotage dans les claustras cubiques qui nous ont servi de coffrage céramique dans les poutres "A" (modèles réduits). Pour tenir compte de l'anisotropie, le carrotage a été effectué dans le sens longitudinal des claustras, sens dans lequel ils sont sollicités dans le linteau composite (P1).

I.3.2.1. Essais de traction

Les essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes céramiques de 12 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur. La figure I-20 schématise le dispositif expérimental utilisé ainsi que les points de mesure choisis tandis que les valeurs des contraintes de rupture obtenues sont consignées dans le tableau I.8.

FIGURE I-18 CONTRAINTE-DEFORMATION DU BETON
A 14 JOURS

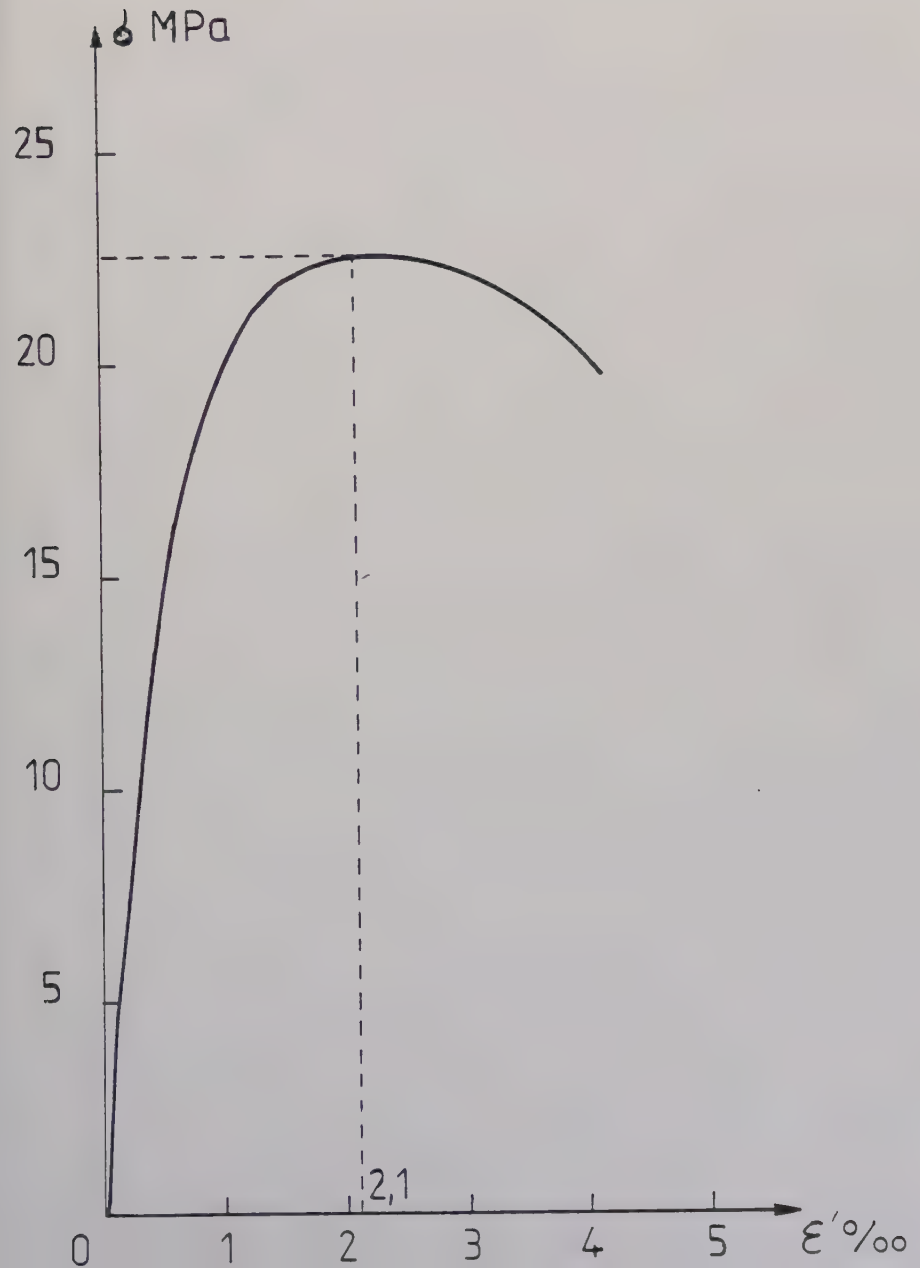
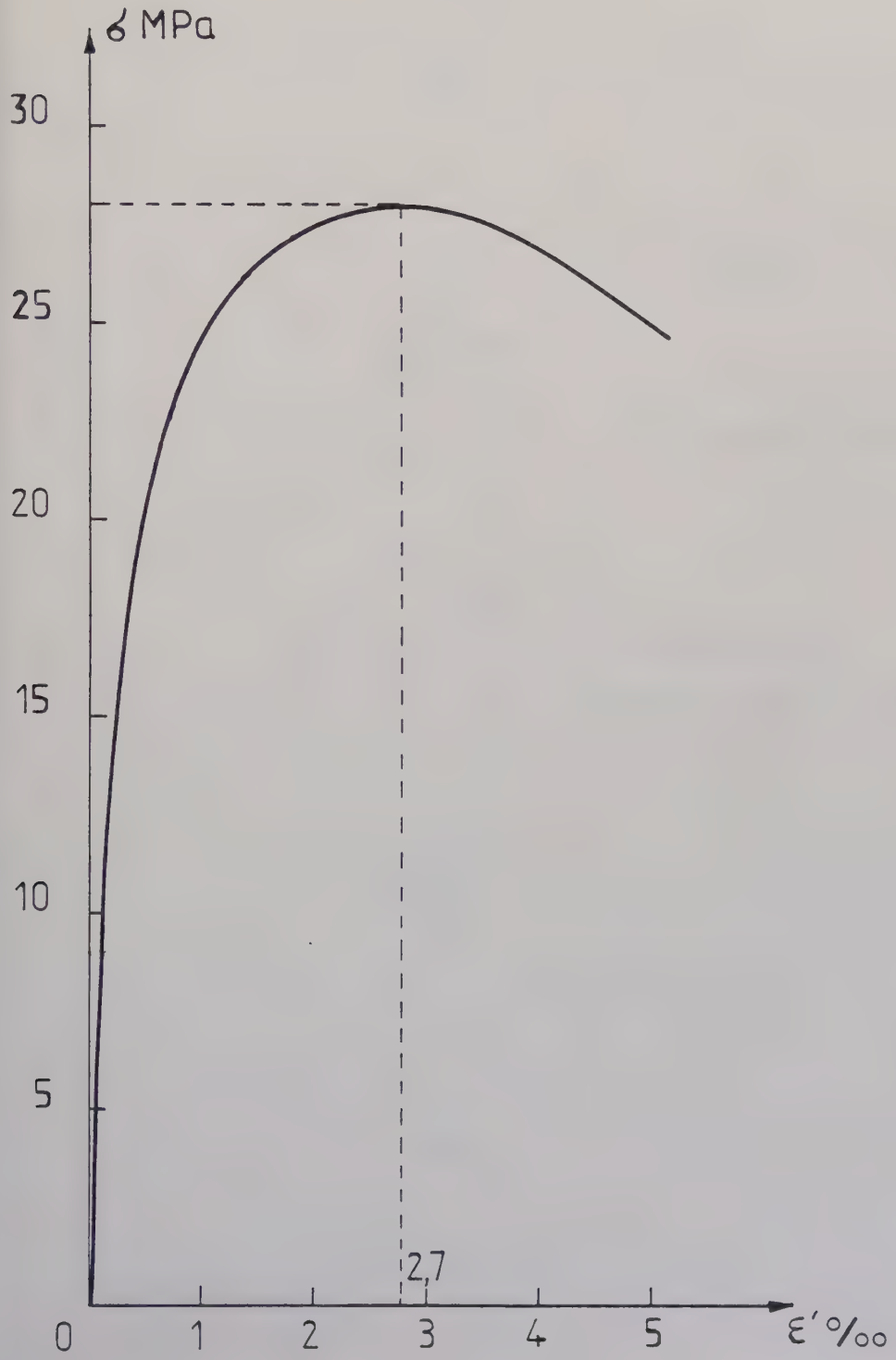


FIGURE I-19: CONTRAINTE-DEFORMATION DU BETON A 28 JOURS



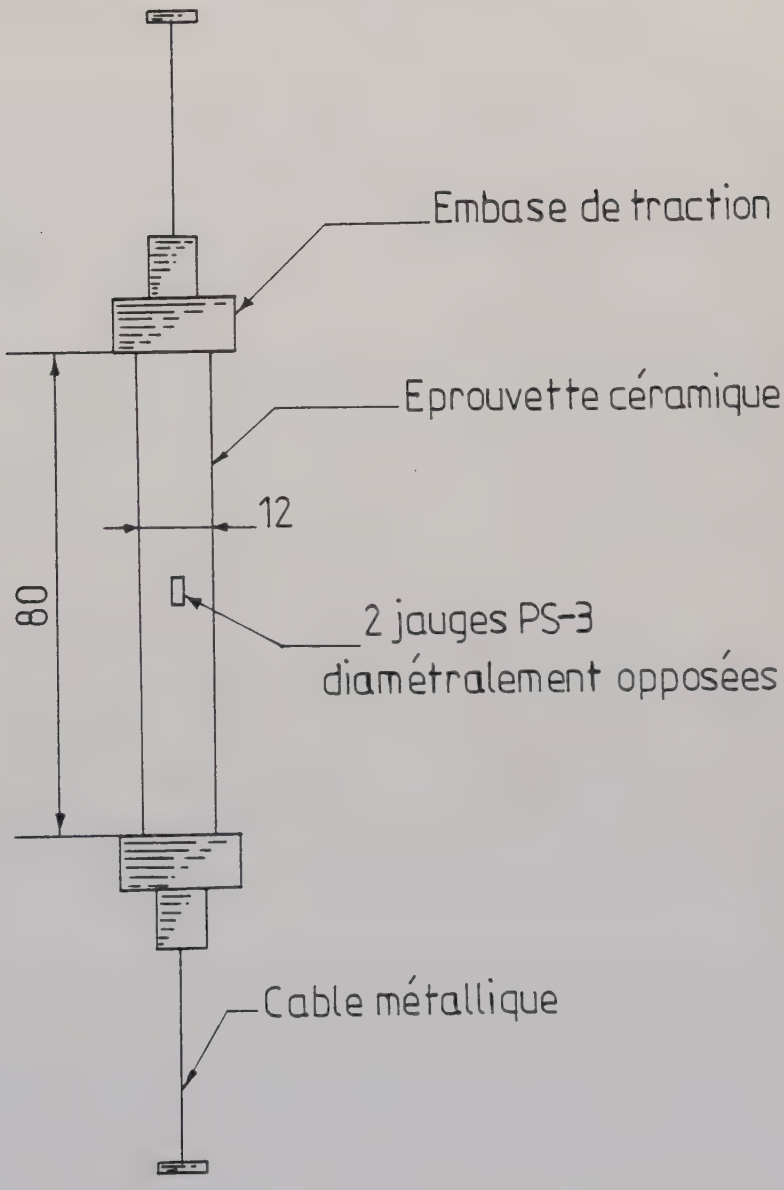


FIGURE I-20:DISPOSITIF DE TRACTION DE LA CERAMIQUE

On peut remarquer dans ce tableau la relative concordance des contraintes de rupture des différentes éprouvettes, en effet l'écart type est égal à 1, avec une moyenne arithmétique de 14,5 MPa.

Numéro Eprouvette	1	2	3	4	5
Contraintes de rupture MPa	13	14	16	15	14,5

Tableau I.8

Le diagramme contrainte - déformation résultant est représenté sur la figure I.21

I.3.2.2. Essais de compression

Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes ayant même diamètre que précédemment mais cette fois avec une hauteur plus courte, double du diamètre pour nous affrancir de l'effet du flambement. Le dispositif utilisé est représenté sur la figure I.22 ainsi que le diagramme contrainte-déformation. Les contraintes de rupture des différentes éprouvettes sont données dans le tableau I.9 On peut y remarquer la dispersion plus importante des valeurs, en effet l'écart type vaut 12,5, avec une moyenne arithmétique de 130 MPa.

N° Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Contraintes de rupture MPa	140	120	120	120	120	150	120	148	145	124

Tableau I.9

FIGURE I-21:CONTRAINTE-DEFORMATION DE LA CERAMIQUE EN TRACTION.(moyenne)

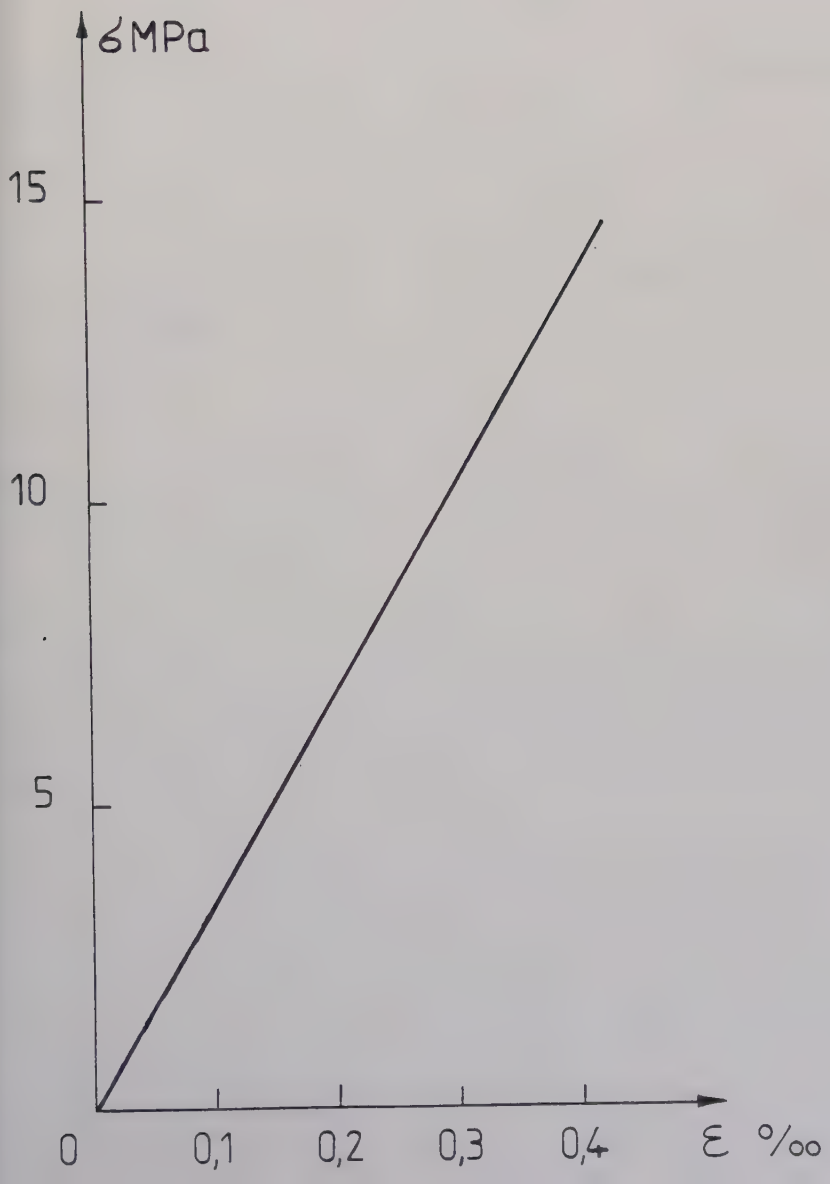
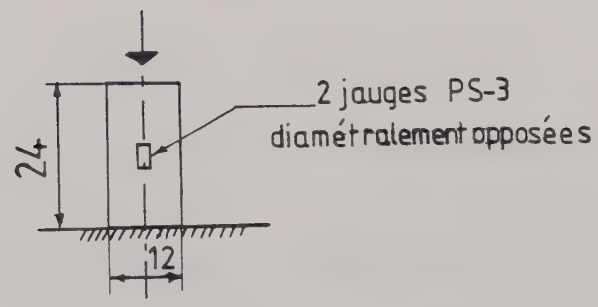
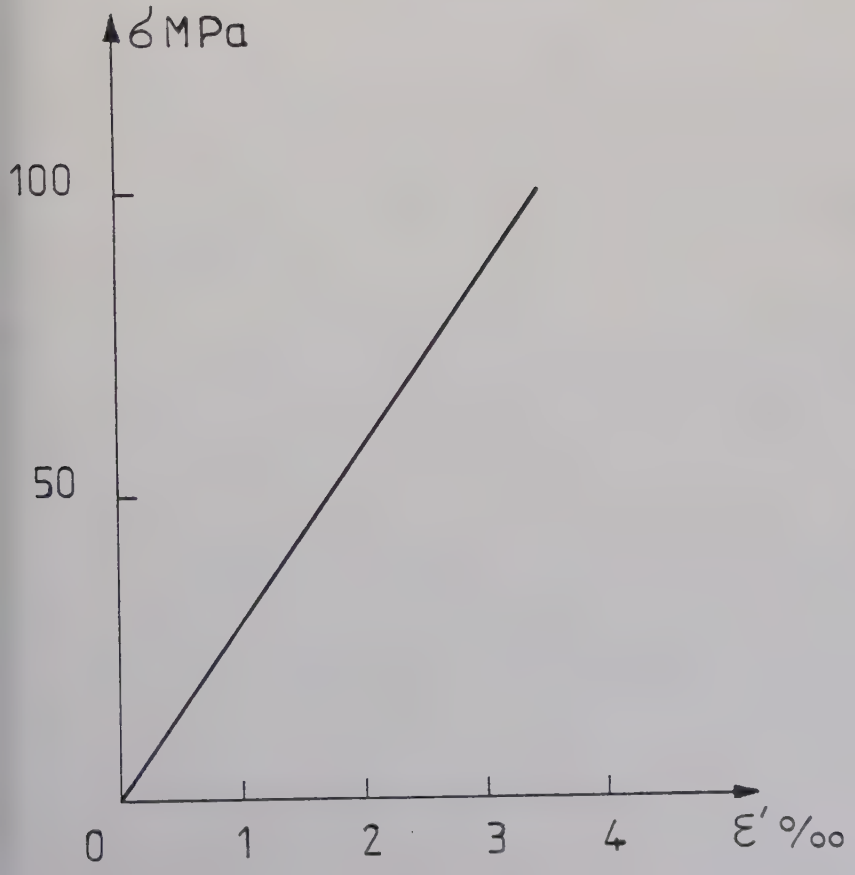


FIGURE I-22: CONTRAINTE-DEFORMATION DE LA CERAMIQUE EN COMPRESSION (moyenne)



EPROUVETTE CERAMIQUE



I.3.3. Aciers

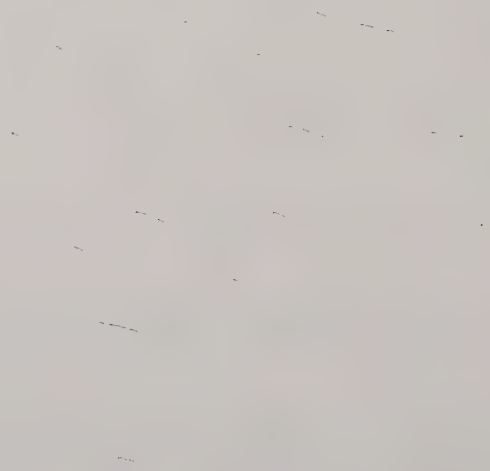
Pour toutes les poutres essayées nous avons utilisé comme armatures tendues des aciers Tor de diamètre Ø 12 couramment utilisé dans la pratique pour les linteaux. Les armatures d'effort tranchant sont constituées par des étriers Ø 6 (poutres "A") et par des cadres Ø 6 (poutres "B"). Bien entendu la section des armatures tendues et l'écartement des étriers sont déterminés par calcul théorique.

Les plans de ferraillage correspondants sont donnés dans les figures I.3 et I.4).

I.3.4. Association céramique-béton : essai d'adhérence

Dans l'association de la céramique et du béton qui fait l'objet de notre étude, outre l'effet de l'absorption de l'eau du béton par la céramique (succion), il y a un paramètre fondamental qui est l'adhérence entre les deux matériaux. Ce paramètre est d'ailleurs largement dépendant du pouvoir de succion de la céramique, donc de son état de surface (lisse ou rugueuse) et de son réseau capillaire comme l'ont montré divers chercheurs dont notamment GRANDET (5).

C'est ainsi qu'il nous a paru indispensable de faire des essais d'adhérence entre les deux matériaux en présence afin de nous assurer de la régularité du paramètre "adhérence" dans le cas des poutres "A", car il pourrait expliquer d'éventuels écarts entre les comportements des poutres P1, d'autant plus que les petits claustras qui nous ont servi de coffrage "définitif" ne sont pas en principe destinés à l'usage que nous en avons fait. En effet, ils sont conçus pour enjoliver les façades des bâtiments (comme éléments de plastique architecturale). Par contre dans le cas des poutres "B" (vraie grandeur) où nous avons utilisé des briques pour linteaux



fabriquées spécialement pour cet usage, donc ayant une surface de contact traitée pour bien adhérer au béton, nous pouvions légitimement compter sur une adhérence bonne et régulière entre les deux matériaux. Pour cette raison, nous n'avons pas jugé utile de faire des essais d'adhérence pour cette catégorie là.

I.3.4.1. Essai d'adhérence

L'adhérence entre la céramique et le mortier a fait l'objet d'études par Grandet (5). Nous aurions pu adopter le même modèle d'échantillon que ce dernier, mais puisque nous avons du béton et non du mortier, nous avons préféré le type d'éprouvette représenté sur la figure I.23, qui nous a semblé plus approprié à la grosseur des granulats utilisés.

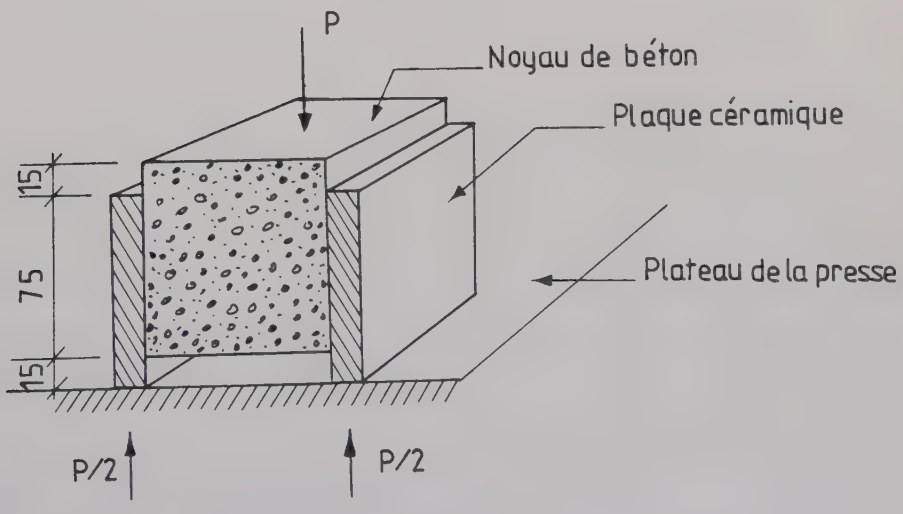


FIGURE I-23 EPROUVETTE D'ADHERENCE CERAMIQUE-BETON

Ces essais d'adhérence ont porté sur deux types d'éprouvettes se distinguant par l'état d'humidité de la céramique au coulage du béton qui sont :

- céramique sèche ,
- céramique immergée pendant 48 h (soit 100 % d'humidité), délai de saturation selon divers chercheurs (2)

La comparaison des résultats relatifs aux deux types d'échantillons, consignés dans le tableau I.10 nous permet de mettre en évidence le rôle de la succion de la céramique sur l'adhérence entre les deux matériaux et par conséquent sur la résistance du linteau composite. On remarque dans ce tableau une relative dispersion des taux d'adhérence entre les éprouvettes d'un même type, ceci pouvant aller du simple au double. Nous pouvons également y remarquer que la contrainte moyenne d'adhérence est plus faible dans le cas de la céramique saturée que dans celui de la céramique sèche. Ce phénomène s'explique par le fait que l'usinage initial de l'épaisseur des claustras pour les mettre à la dimension voulue entraîne une irrégularité

	CONTRAINTES D'ADHERENCE EN daN/cm2								
N° Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
Céramique sèche	17,75	13,6	17	20,25	9,7	16,65	12,5	24,3	17
Céramique saturée	15,55	8,35	5,5	11,1	12	11,4	10,5	9,4	10

Tableau I.10

de sa surface de contact (la répartition et l'étendue des zones atteintes par la scie varient d'une pièce à l'autre, ce qui peut changer la structure poreuse de l'interface céramique et influencer ainsi la succion.

Enfin, la comparaison des contraintes moyennes d'adhérence données dans le tableau I.10 permet d'affirmer que la suppression de la succion capillaire a pour conséquence une diminution appréciable de l'adhérence. Ceci s'explique par le fait que les pores de la céramique étant saturés l'échange d'eau entre "l'écorce céramique" et le "noyau béton" n'a plus lieu. Il en résulte que les constituants hydratés du béton ne s'insèrent pas très bien dans les capillaires de la céramique ce qui se traduit par une moindre adhérence entre les deux matériaux. On peut le penser quand on sait le rôle très important joué par les cristaux d'ettringitte dans le mécanisme de la liaison entre la terre cuite et la pâte de ciment, montré par certains chercheurs (6).

I.3.4.2. Essai de contrôle

Pour évaluer théoriquement les moments de rupture des poutres que sont les linteaux composites (P1) des normes britanniques portant sur la maçonnerie armée (4) définissent une "résistance caractéristique en compression par flexion" déterminée par écrasement d'éprouvettes mixtes céramique-béton.

Dans ce but, lors de l'essai de chaque série de poutres P1, P2 et P3, nous avons soumis à la compression simple jusqu'à écrasement deux éprouvettes mixtes céramique - béton. Les figures I.24 et I.25 représentent les schémas de ces types d'éprouvettes pour les poutres "A" et "B" respectivement. Ces normes britanniques préconisent de prendre comme "résistance caractéristique en compression par flexion" de calcul une valeur égale à 0,7 fois la moyenne des résistances en compression des éprouvettes mixtes sus-mentionnées.

Les valeurs moyennes des résistances à l'écrasement obtenues sont consignées dans le tableau I.11. Il n'y avait pas d'écarts importants entre les résistances des différentes éprouvettes testées (+ 6% maxi). Le soin que nous avons apporté à la fabrication des éprouvettes en est la raison.

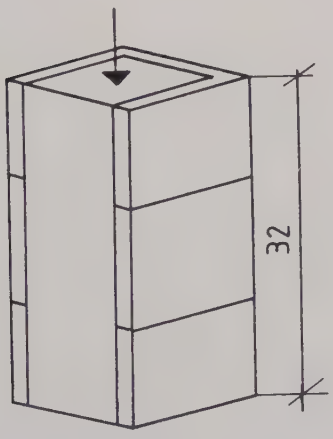


FIGURE I-24: EPROUVETTE MIXTE "A"

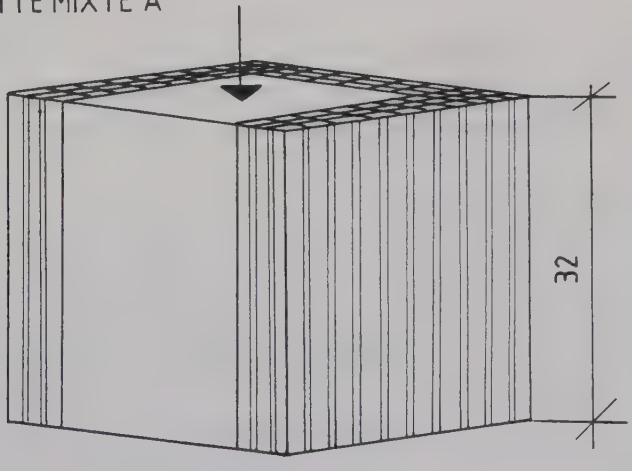


FIGURE I-25: EPROUVETTE MIXTE "B"

CONTRAINTES MOYENNES DE COMPRESSION DES EPROUVETTES MIXTES en daN/cm2		RESISTANCE CARACTERISTIQUE DE CALCUL 0,7 en daN /cm2
$\sigma'_{14\ j}$ (poutres "A")	270	189
$\sigma'_{28\ j}$ (poutres "B")	258	180

Tableau I.11

On remarque que $\sigma'_{28(EM\ "B")}$ est inférieure à $\sigma'_{14(EM\ "A")}$. Cela peut paraître surprenant mais s'explique par le fait que, d'une part l'"écorce céramique" du type "B" est moins résistante que celle du type "A" en raison même de leur différence de configuration (pleine pour "A" et alvéolaire pour "B") et aussi de la présence de fissures initiales dans le type "B", d'autre part l'effet du frettage des plateaux de la presse pourrait être plus important dans le type "A" que dans le type "B" où la section est plus grande.

1.4. FABRICATION DES POUTRES D'ESSAI

1.4.1. Poutres en modèles réduits ou "poutres" "A"

Le mélange des constituants solides du béton et son gâchage ont été faits dans un malaxeur à palettes d'axe vertical, ayant un volume maximal de 100 l.

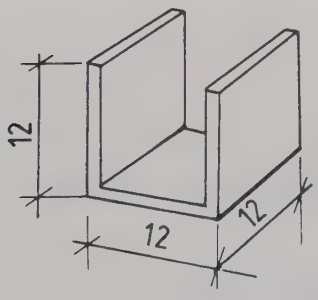
Les constituants solides sont mélangés à sec pendant 3 mn après lesquelles l'eau de gâchage est ajoutée et le malaxage se poursuit pendant trois autres minutes.

I.4.1.1. Coffrages

Les deux poutres P1 et P2 sont coulées dans un coffrage constitué de 10 éléments de claustras cubiques (12 x 12 x 12) dont nous avons scié une paroi (Fig. I.26)

Ces éléments sont alignés sur un plan horizontal et maintenus entre deux planches de contreplaqué à l'aide de serre-joints. Quant à la poutre P3, elle est coulée dans un coffrage en PVC rigoureusement étanche (Fig. I.27).

FIGURE I-26: CLAUSTRA CUBIQUE



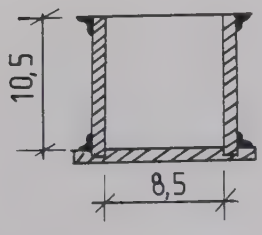


FIGURE I-27: COFFRAGE PVC

I.4.1.2. Appareillage de vibration

La mise en place du béton est effectuée en deux couches. Sa vibration est faite à l'aide d'une aiguille vibrante pendant 10 secondes tous les 15 cm.

1.4.1.3. Conservation

Vingt quatre heures après la mise en place du béton les poutres sont démoulées et placées en salle de conservation dans une atmosphère à 100% d'humidité. Cette conservation dure 10 jours à l'issue desquels nous sortons les poutres pour y mettre en place les dispositifs de mesure (jauges et capteurs).

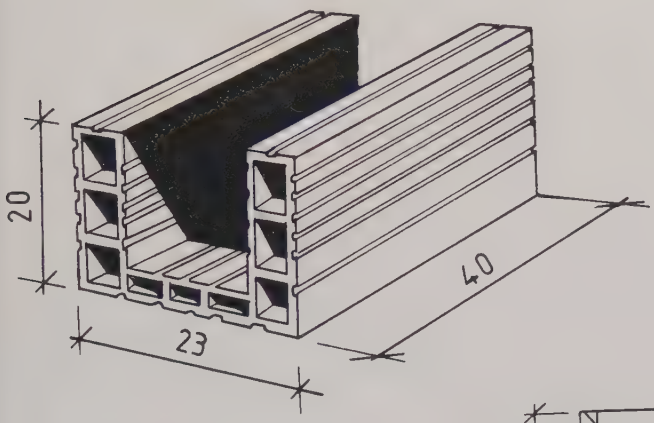
1.4.2. Poutres en "vraie grandeur" ou Poutres "B"

Pour ces poutres, étant donné le volume plus important de béton, nous nous sommes servi d'un malaxeur du même type que précédemment mais de 150 l de capacité cette fois-ci. Les constituants solides sont mélangés à sec pendant 5 minutes, puis après addition de l'eau de gâchage le malaxage se poursuit encore pendant 5 autres minutes.

I.4.2.1. Coffrages

Cette fois-ci P1 et P2 sont coulées dans un coffrage constitué de briques spéciales pour linteaux (Fig. I.28) alignées sur un plan horizontal et maintenues au moyen de serre-joints. Enfin la poutre P3 est coulée dans un coffrage ordinaire en bois schématisé sur la figure I.29.

FIGURE I-28: BRIQUE POUR LINTEAUX



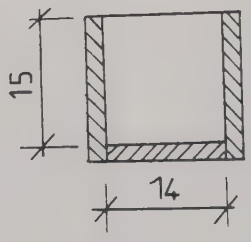


FIGURE I-29: COFFRAGE EN BOIS

I.4.2.2. Appareillage de vibration

Le béton est mis en place en deux couches comme précédemment. L'appareillage de vibration est aussi le même, à la différence qu'ici on vibre pendant 20s tous les 30 cm compte tenu des dimensions plus grandes de ces poutres.

I.4.2.3. Conservation

Trois jours après le coulage, les poutres sont démoulées et conservées dans le local de notre laboratoire jusqu'à la date de leur essai.

CHAPITRE II

RESULTATS POUTRES "A"

CHAPITRE II

RESULTATS POUTRES "A"

Nous présentons dans ce deuxième chapitre les résultats des mesures de déformation que nous avons effectuées sur la première catégorie de poutres (poutres "A" ou modèles réduits).

Toutes les séries essayées sont identiques et constituées de trois poutres P1, P2 et P3 dont nous avons fait varier les caractéristiques constitutives ou de fabrication des unes par rapport aux autres de manière à pouvoir isoler les différents effets en présence (roles mécanique et physico-chimique de la céramique) par simple comparaison de leurs comportements respectifs.

Nous rappelons ci-dessous les définitions de P1, P2 et P3 :

- P1 est une poutre composite céramique-béton-armé que nous obtenons en coulant directement du béton dans un coffrage "définitif" de céramique constitué de petits claustras cubiques dont nous avons préalablement scié une paroi de manière à simuler les briques pour linteaux réelles.

- P2 est une poutre béton-armé seul que nous obtenons en désolidarisant par sciage l'"écorce céramique" du "noyau béton" après durcissement d'une poutre préalablement identique à P1 ;

- P3 est une poutre béton armé seul coulé directement dans un coffrage étanche excluant la succion capillaire de l'eau de gâchage contrairement au coffrage céramique (cas de P1 et de P2) et ayant les mêmes caractéristiques géométriques que le "noyau" P2.

Les trois poutres P1, P2 et P3 sont confectionnées à partir d'un béton issu d'une même gâchée et sont armées de façon identique.

Le premier paragraphe est consacré à la description détaillée de l'allure caractéristique des courbes représentant les lois moment - courbure et moment - flèche ainsi que celle de la loi moment - déformation des différentes poutres (P1, P2 et P3). Ensuite en nous y plaçant dans les différents états successifs rencontrés (état "dit" élastique, état fissuré et état "dit" plastique) nous procédons à la comparaison systèmatique des comportements de P1, P2 et P3.

Au second paragraphe nous comparons également les comportements de P1,P2 et P3 vis-à-vis de l'état limite d'utilisation (déformation et réversibilité).

Le troisième paragraphe est consacré à la comparaison des comportements de P1,P2 et P3 vis-à-vis de l'état limite de rupture. Cette comparaison porte sur leurs moments de rupture expérimentaux respectifs.

Ensuite nous déterminons le moment de rupture théorique de P1 à l'aide de la formule proposée par la B.C.R.A.* (4) pour terminer nous comparons le moment de rupture théorique ainsi obtenu au moment de rupture expérimental de P1 afin de pouvoir porter un jugement sur la validité de la formule utilisée.

Enfin le quatrième et dernier paragraphe est consacré aux conclusions résultant de la synthèse des résultats obtenus.

* B.C.R.A. : British Ceramic Research Association

II.1. ALLURE CARACTERISTIQUE DES COURBES OBTENUES

II.1.1. Lois : Moment-flèche et moment-courbure

Les figures II.1. à II.8 illustrent la comparaison des lois : moment flèche de P1, P2 et P3 tracées sur le même diagramme, tandis que les figures II.9 à II.16 illustrent la comparaison de leurs lois : moment - courbure tracées sur le même diagramme pour les différents essais effectués.

On observe sur ces figures la même disposition systématique des courbes correspondant à P1, P2 et P3, de l'origine à la rupture. On peut aussi remarquer que ces courbes ont une allure trilinéaire quelle que soit la poutre considérée (P1, P2, ou P3) ; nous retrouvons en cela les résultats de nombreux expérimentateurs. En effet de nombreux essais nous ont appris qu'une poutre en béton armé, sollicitée jusqu'à rupture connaît successivement trois états différents (9) comme le montre la figure ci-dessous

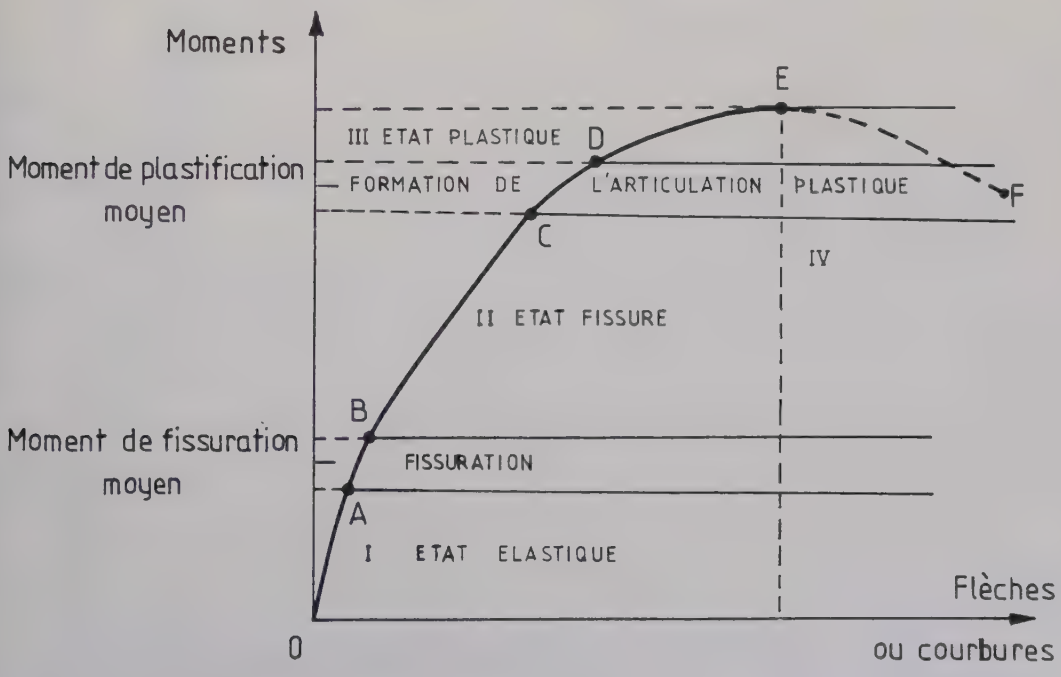


FIGURE II-1: POUTRES "A" ESSAI 1_FLECHE-CHARGE

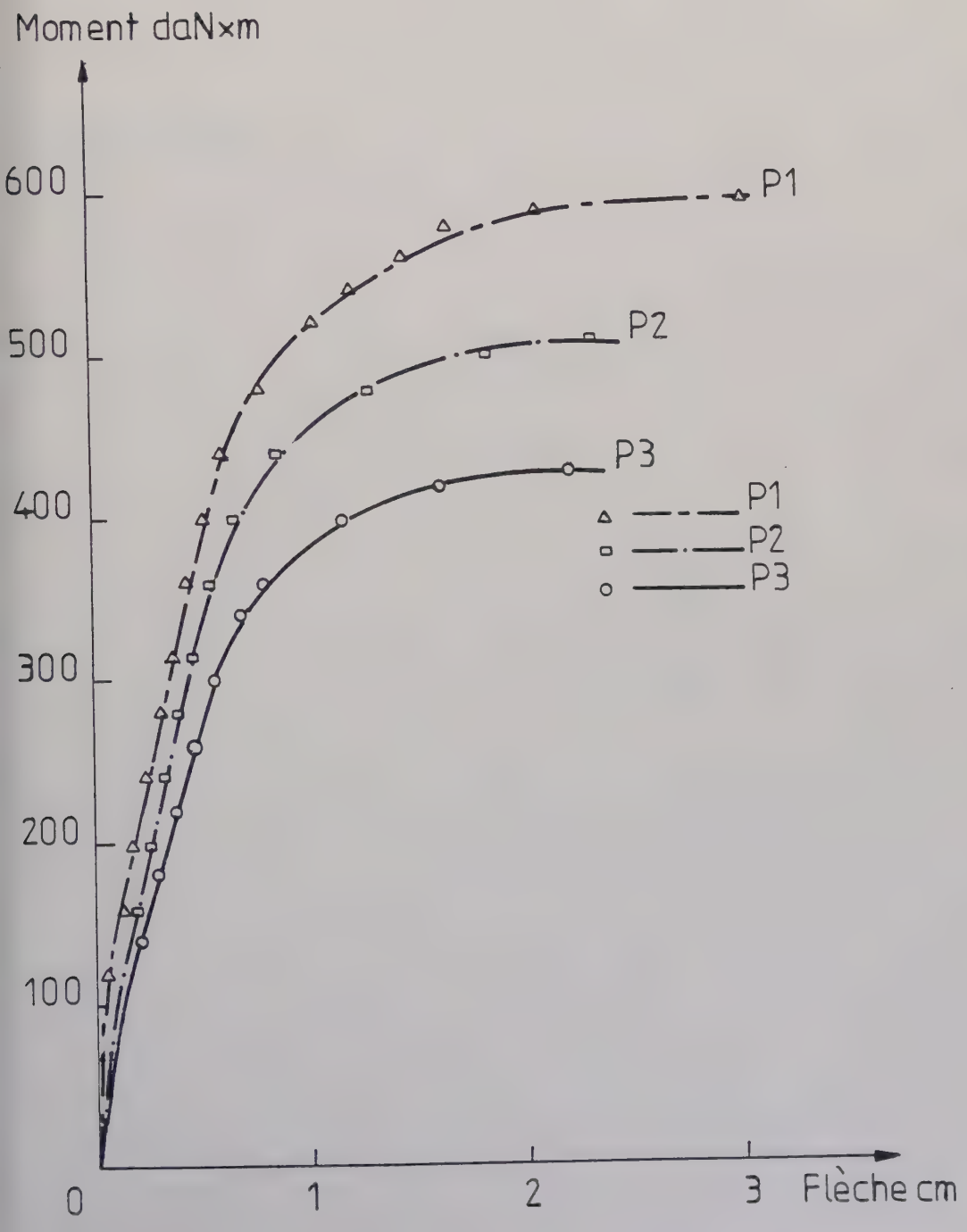


FIGURE II-2: POUTRES "A" ESSAI 2_FLECHE-CHARGE

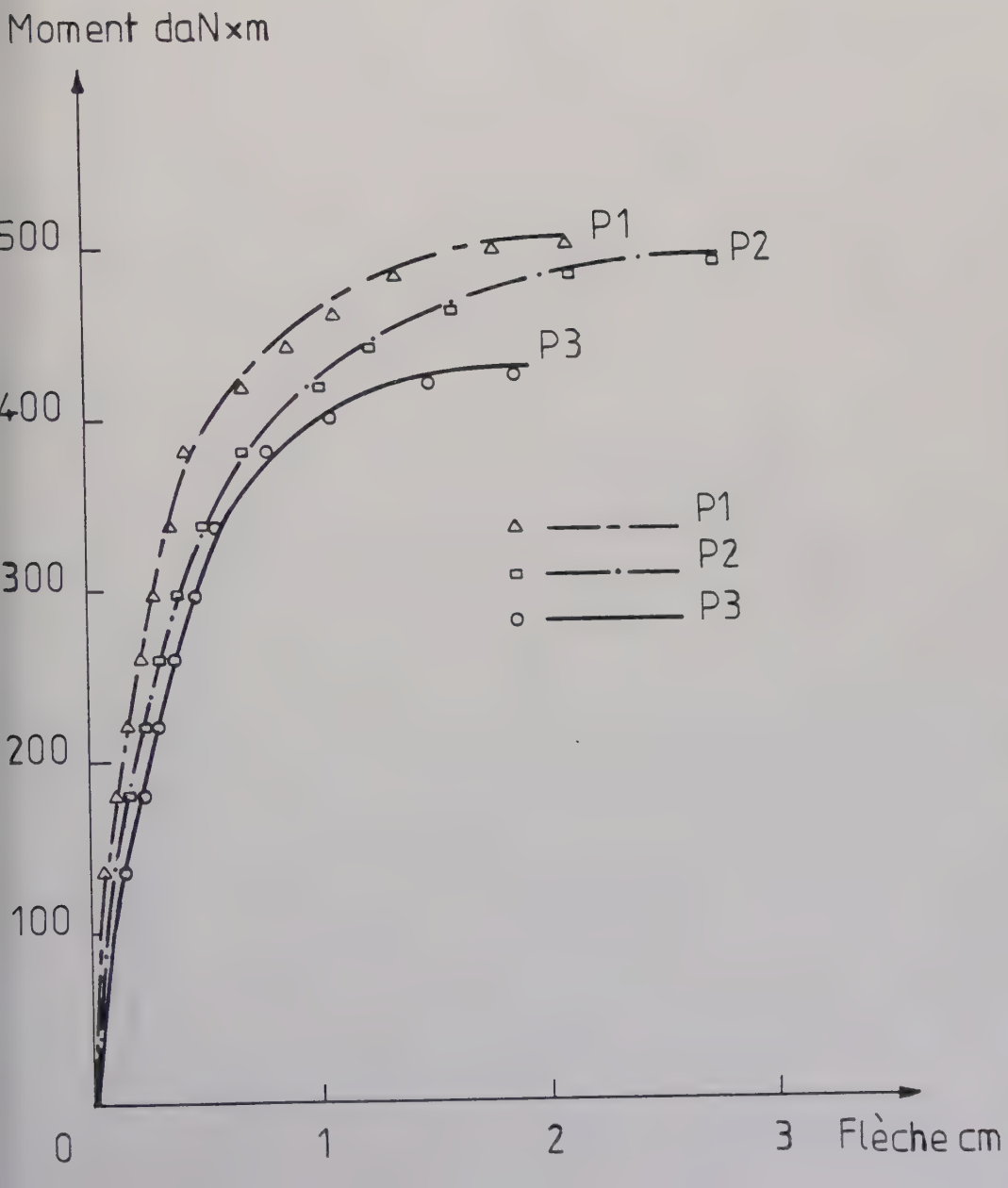


FIGURE II-3: POUTRES "A" ESSAI 3_FLECHE-CHARGE

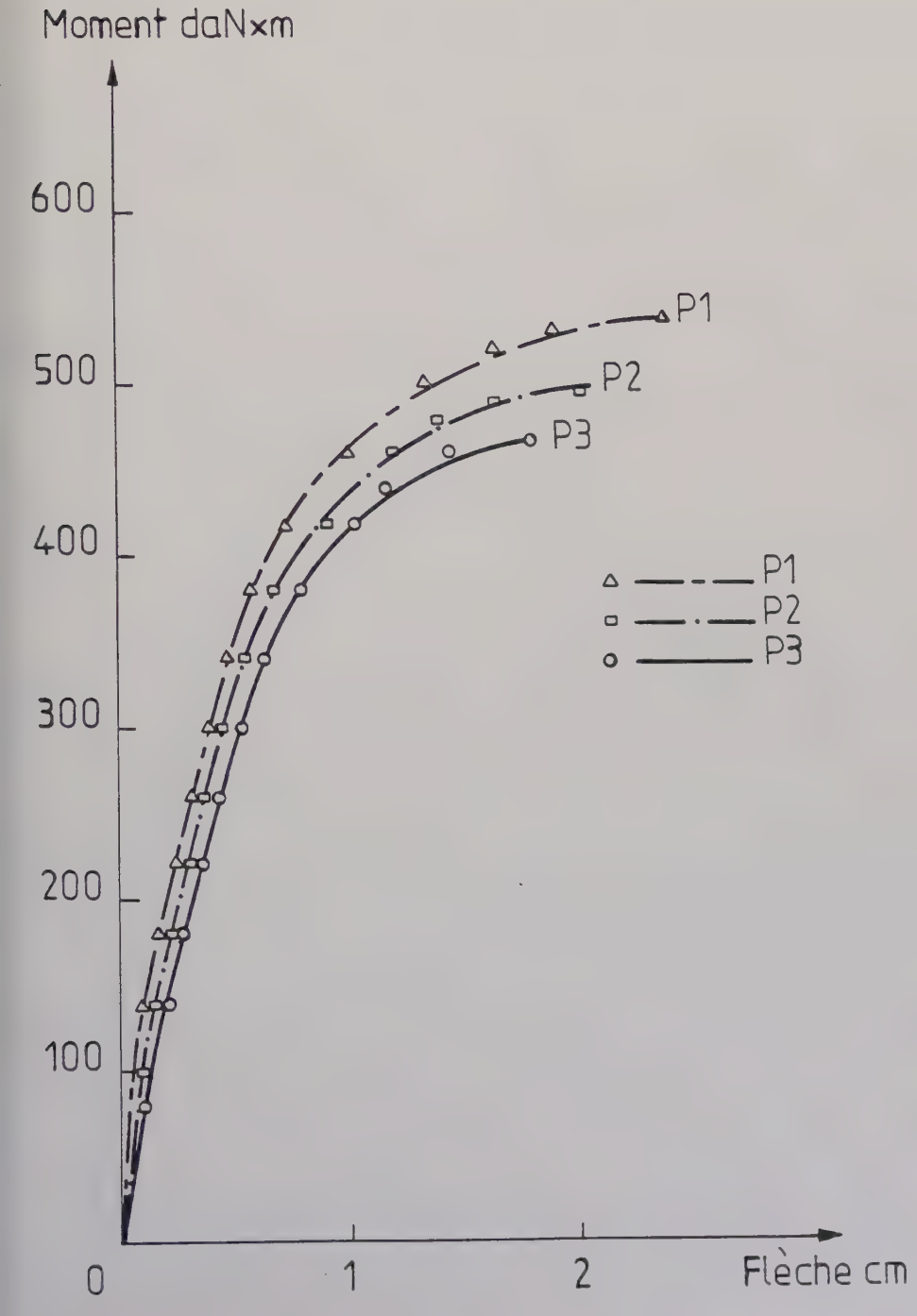


FIGURE II-4: POUTRES "A" ESSAI 4_FLECHE-CHARGE

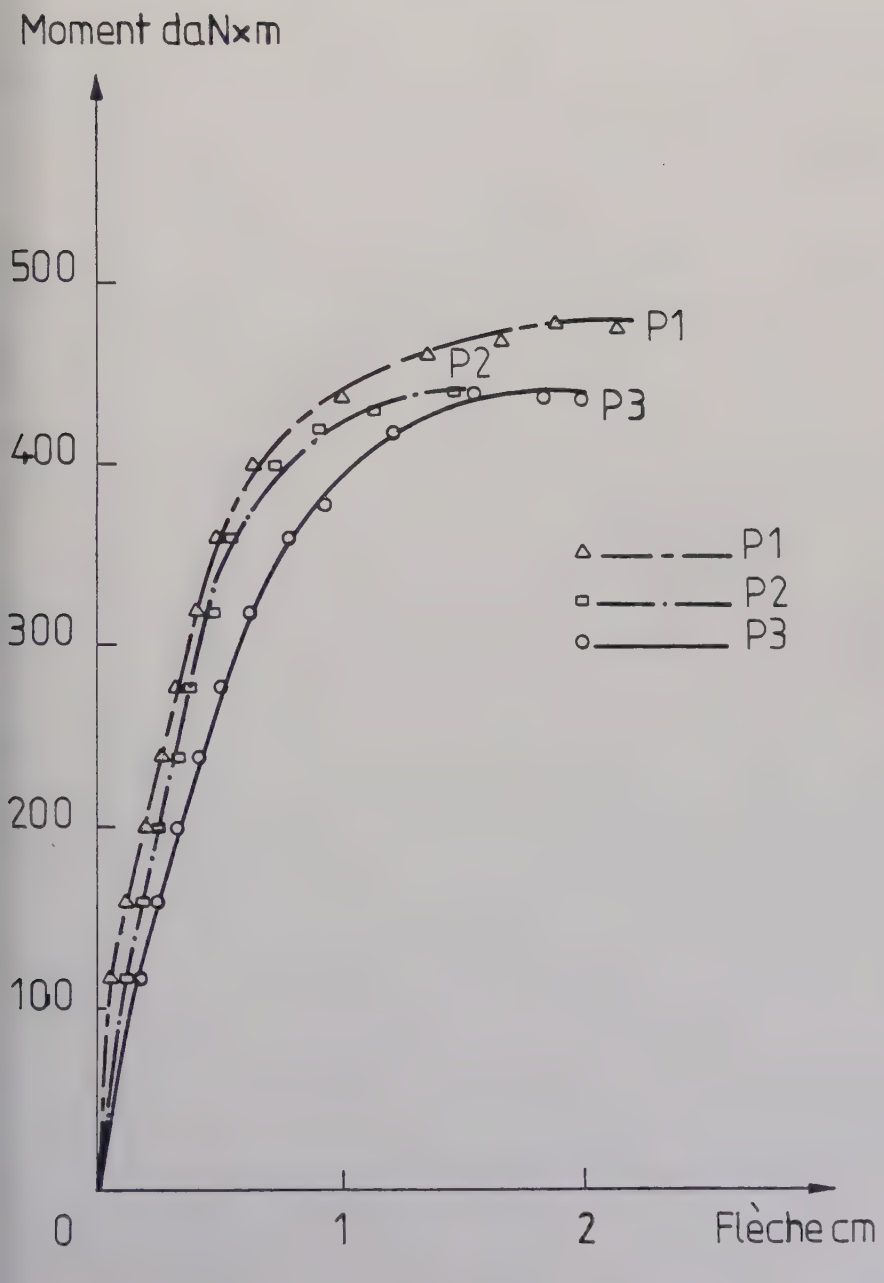


FIGURE II-5 : POUTRES "A" ESSAI 5_FLECHE-CHARGE

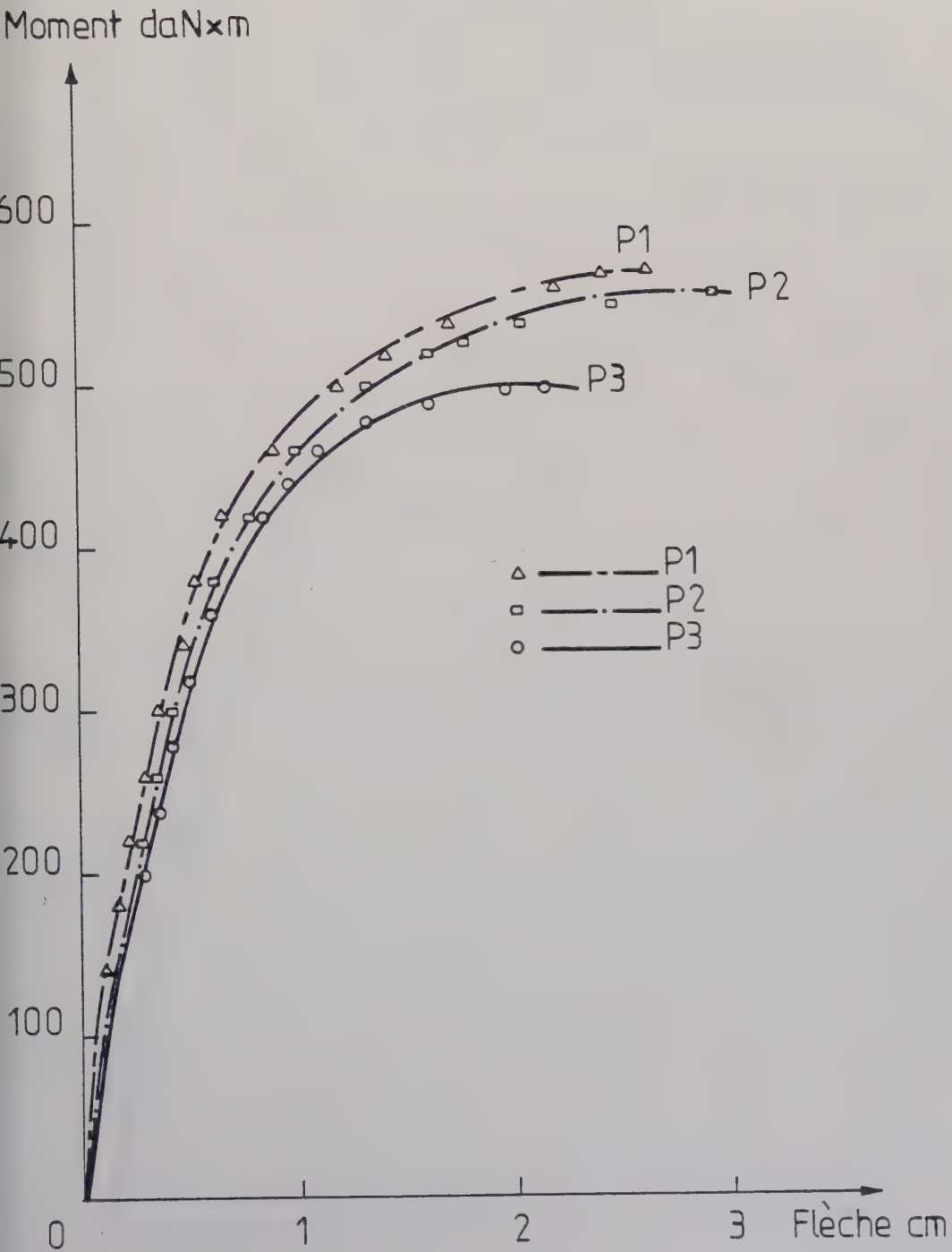


FIGURE II-6. POUTRES "A" ESSAI 6_FLECHE-CHARGE

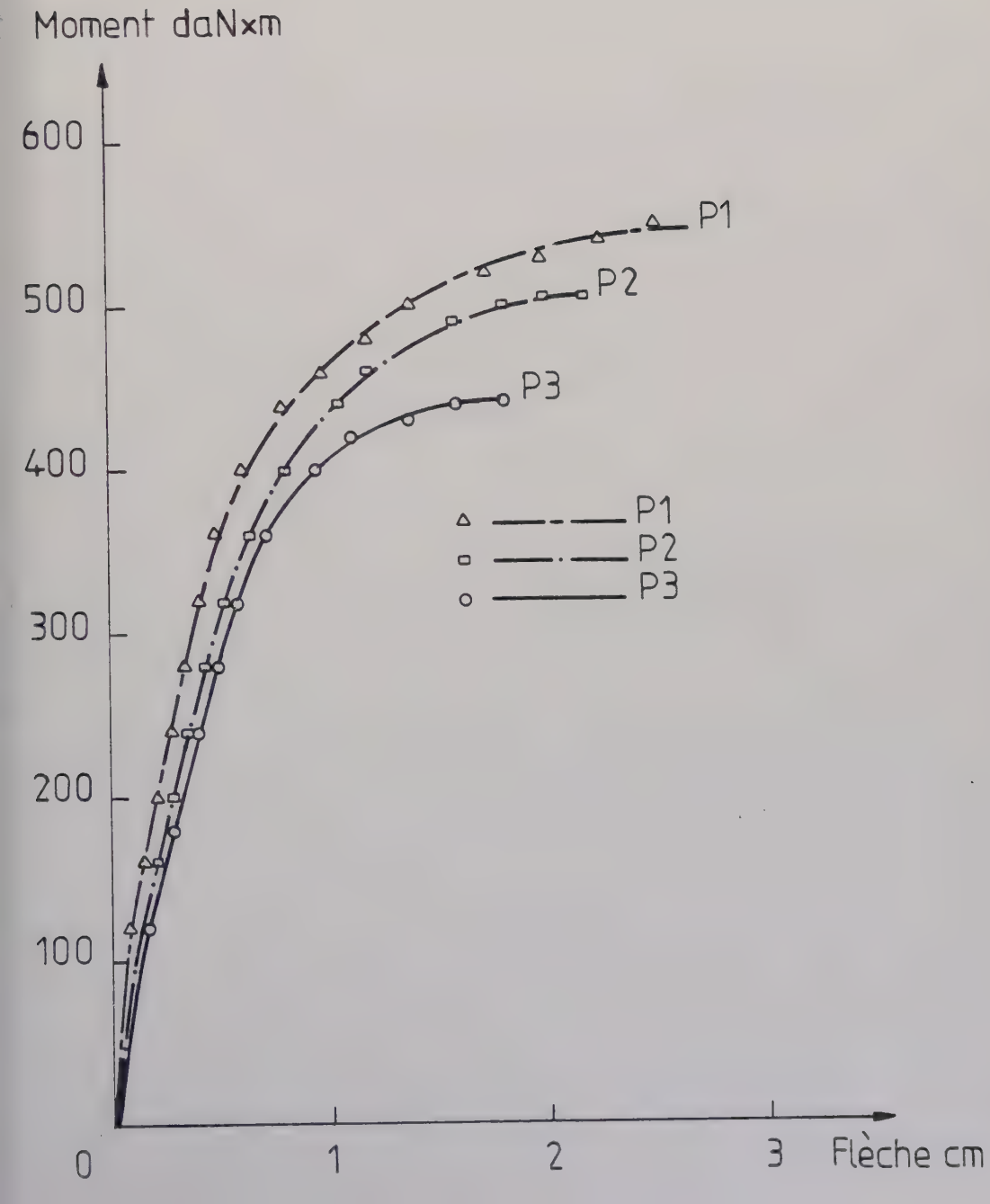


FIGURE II-7 POUTRES "A" ESSAI 7_FLECHE-CHARGE

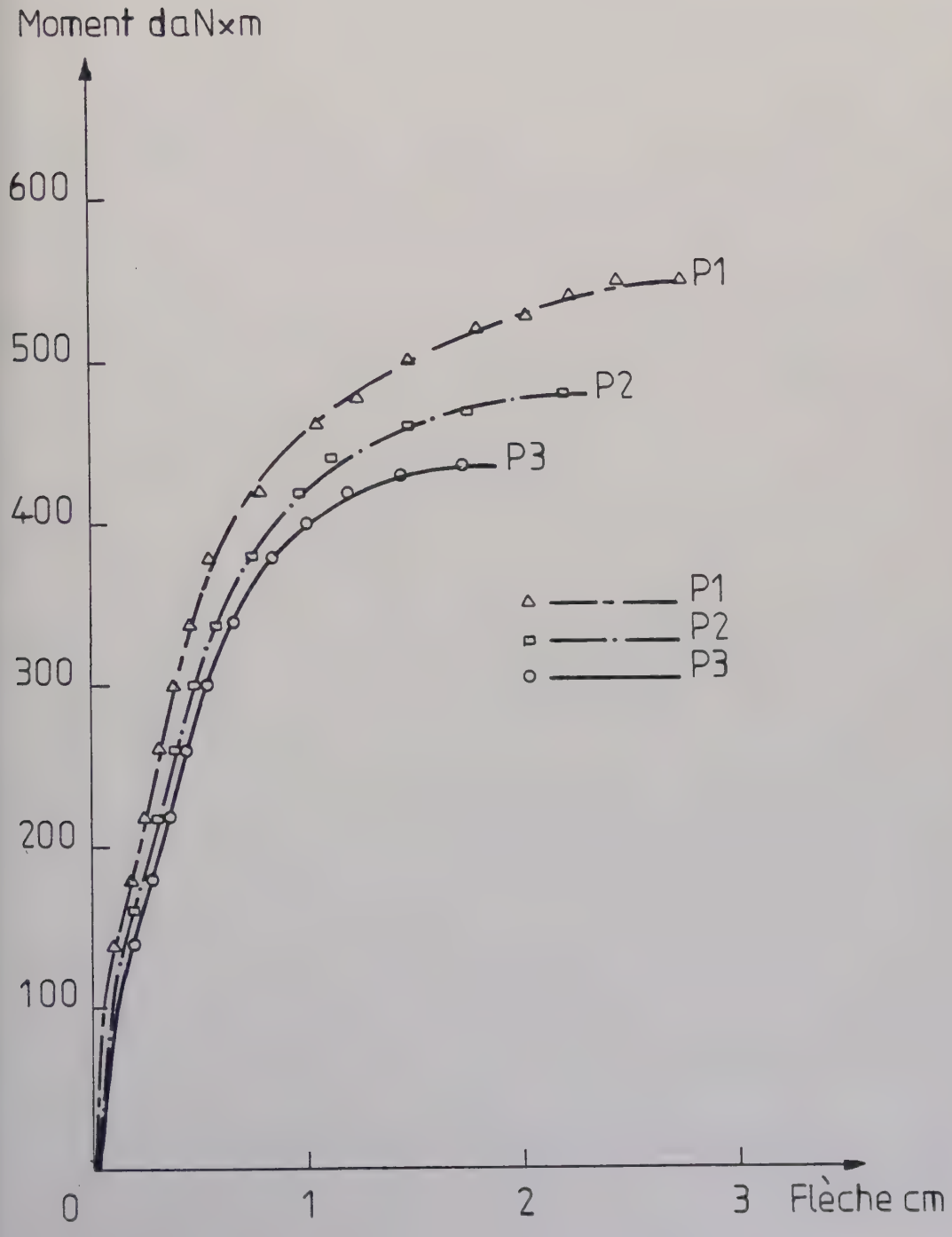


FIGURE II-8 POUTRES "A" ESSAI 8_FLECHE-CHARGE

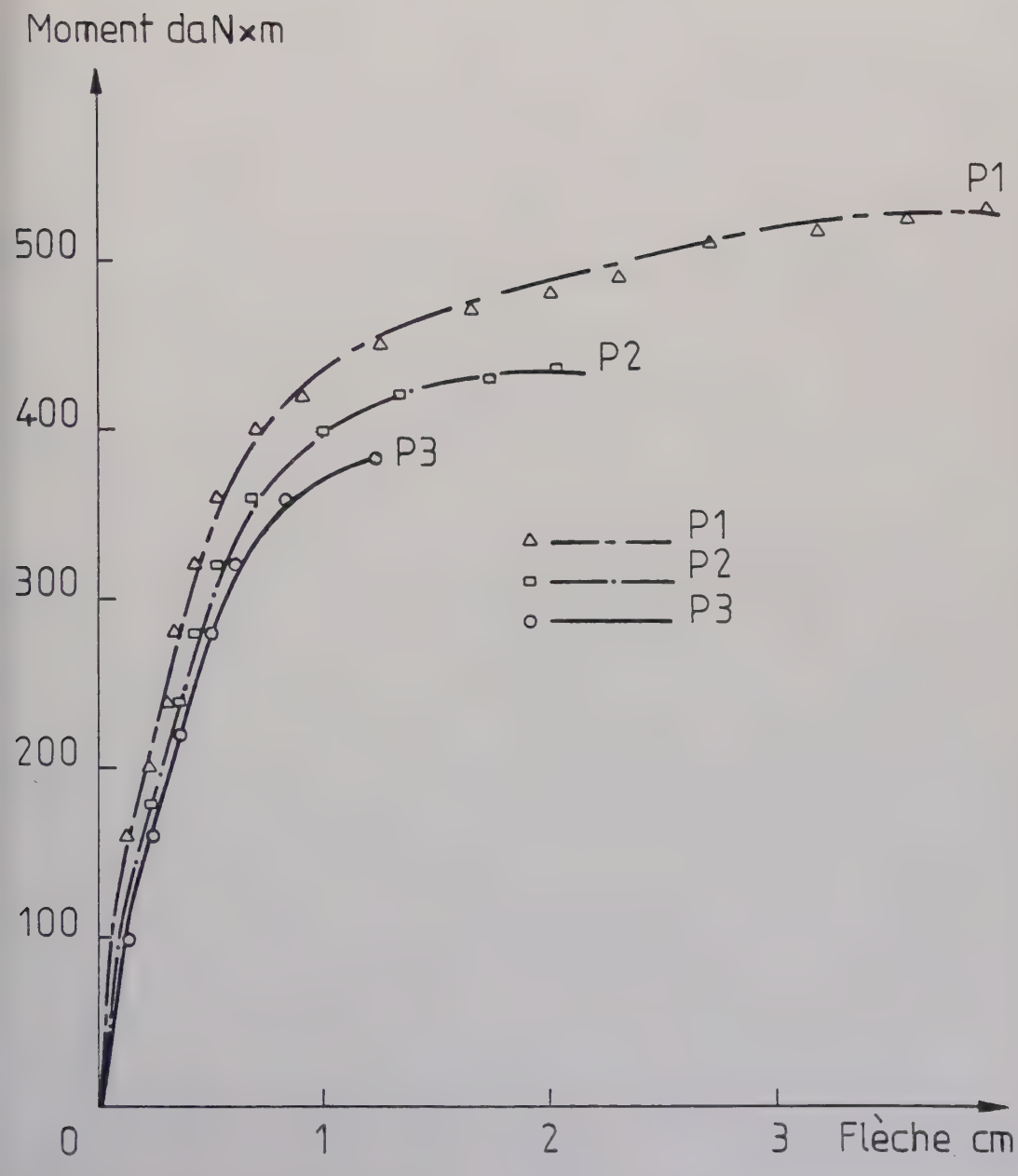


FIGURE II-9: POUTRES "A" ESSAI 1_MOMENT-COURBURE

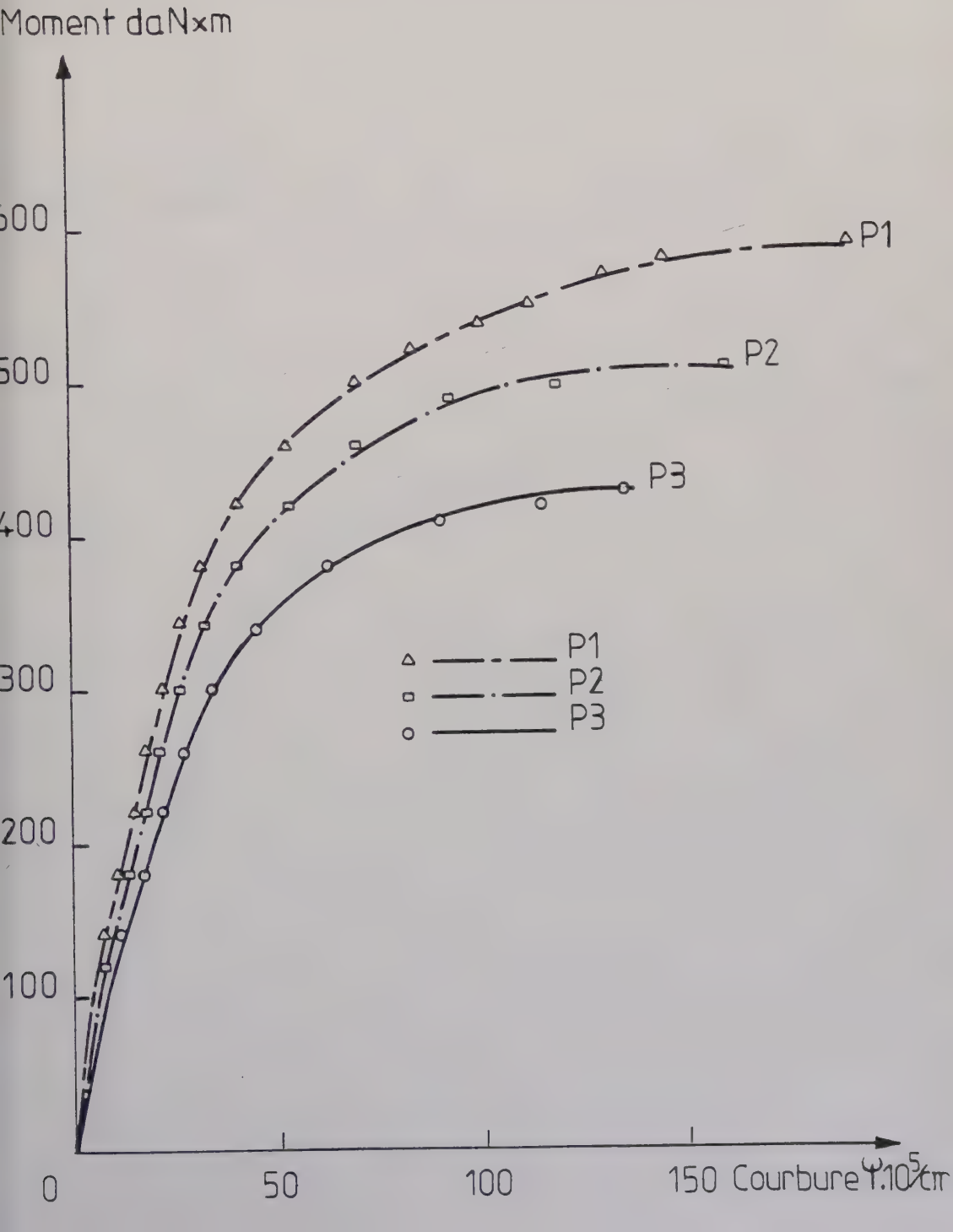


FIGURE II-10: POUTRES "A" ESSAI 2_MOMENT-COURBURE

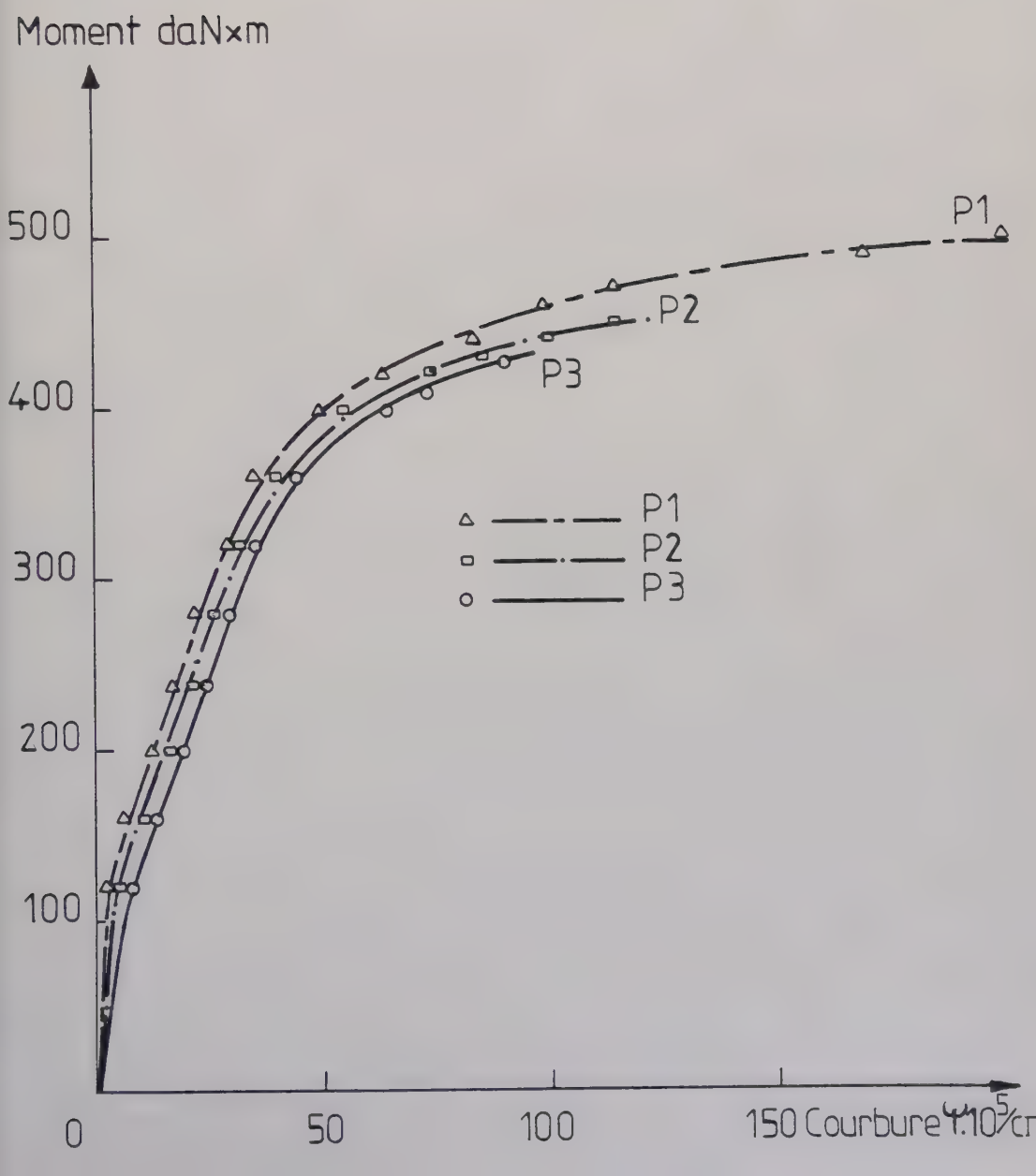


FIGURE II-11: POUTRES "A" ESSAI 3_MOMENT-COURBURE

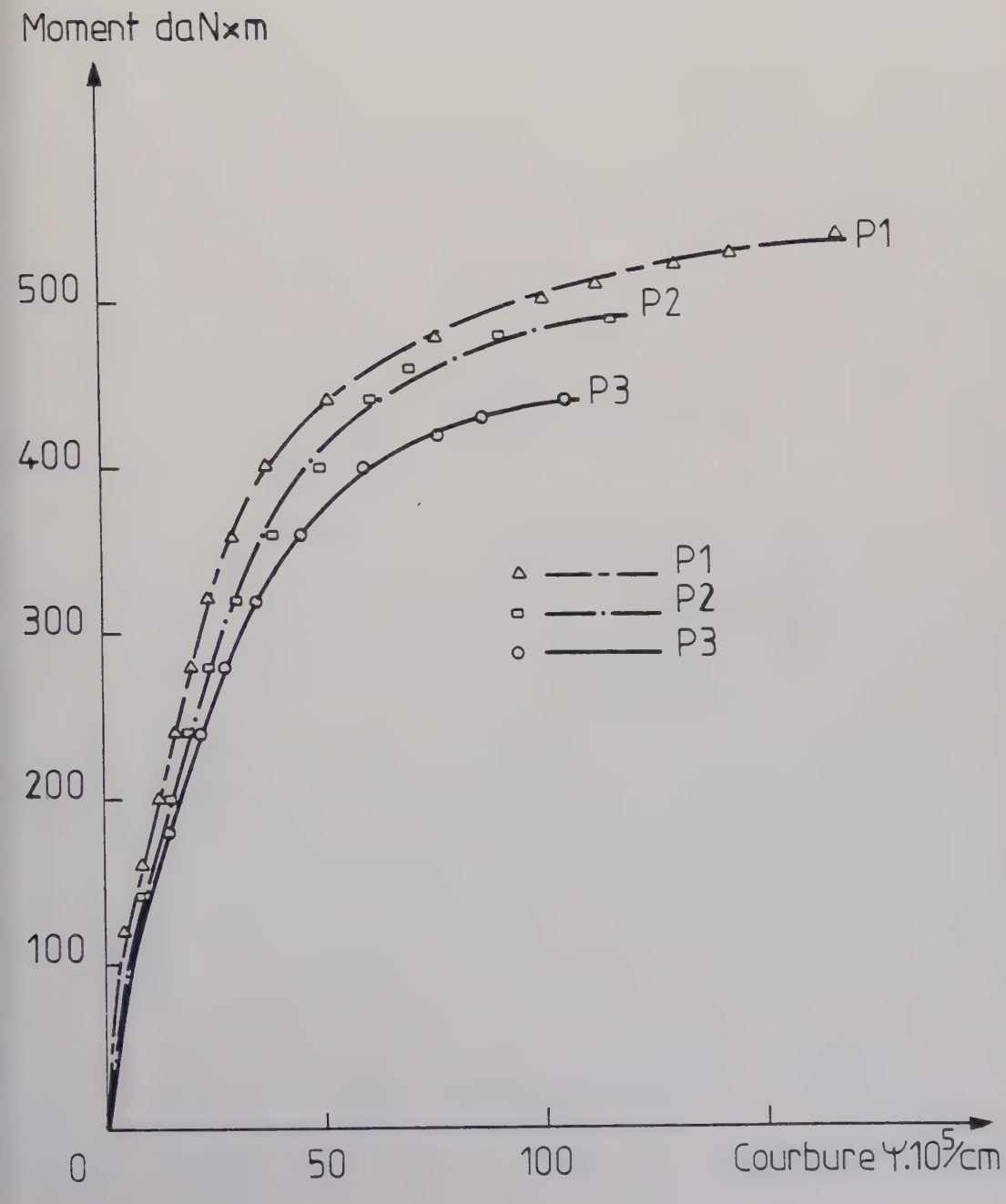


FIGURE II-12: POUTRES "A" ESSAI 4_MOMENT-COURBURE

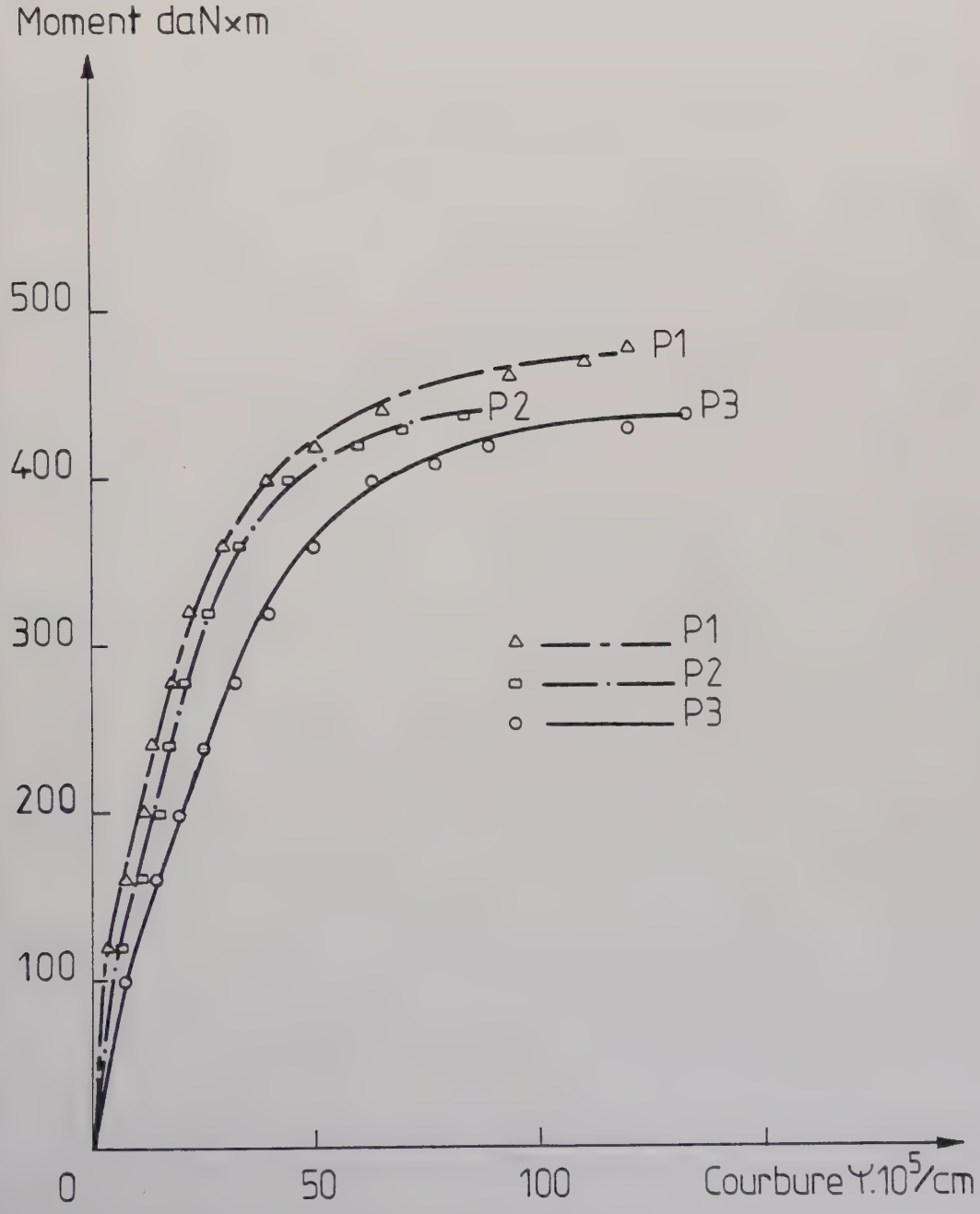


FIGURE II-13: POUTRES "A" ESSAI 5_MOMENT-COURBURE

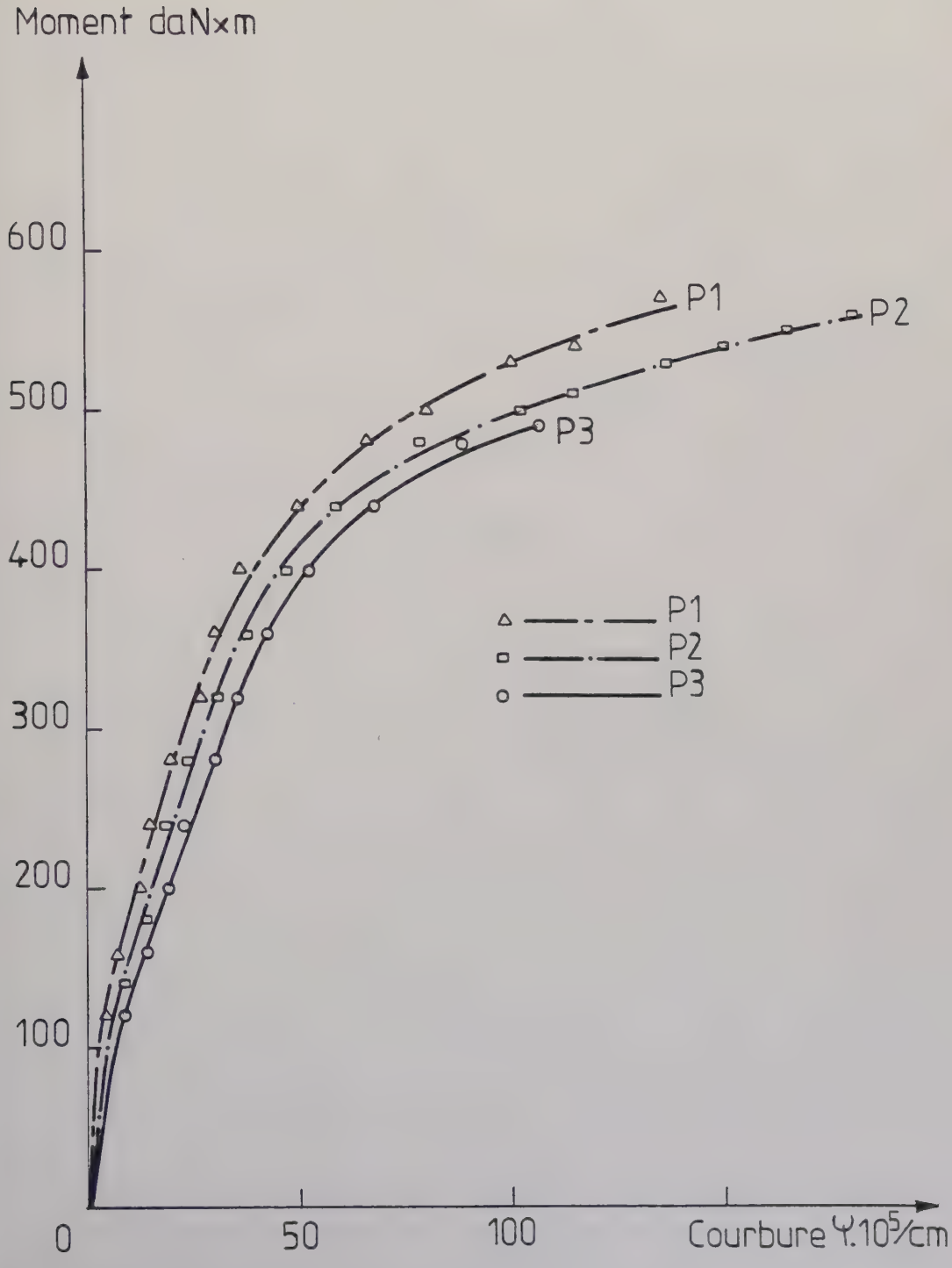


FIGURE II-14: POUTRES "A" ESSAI 6_MOMENT-COURBURE

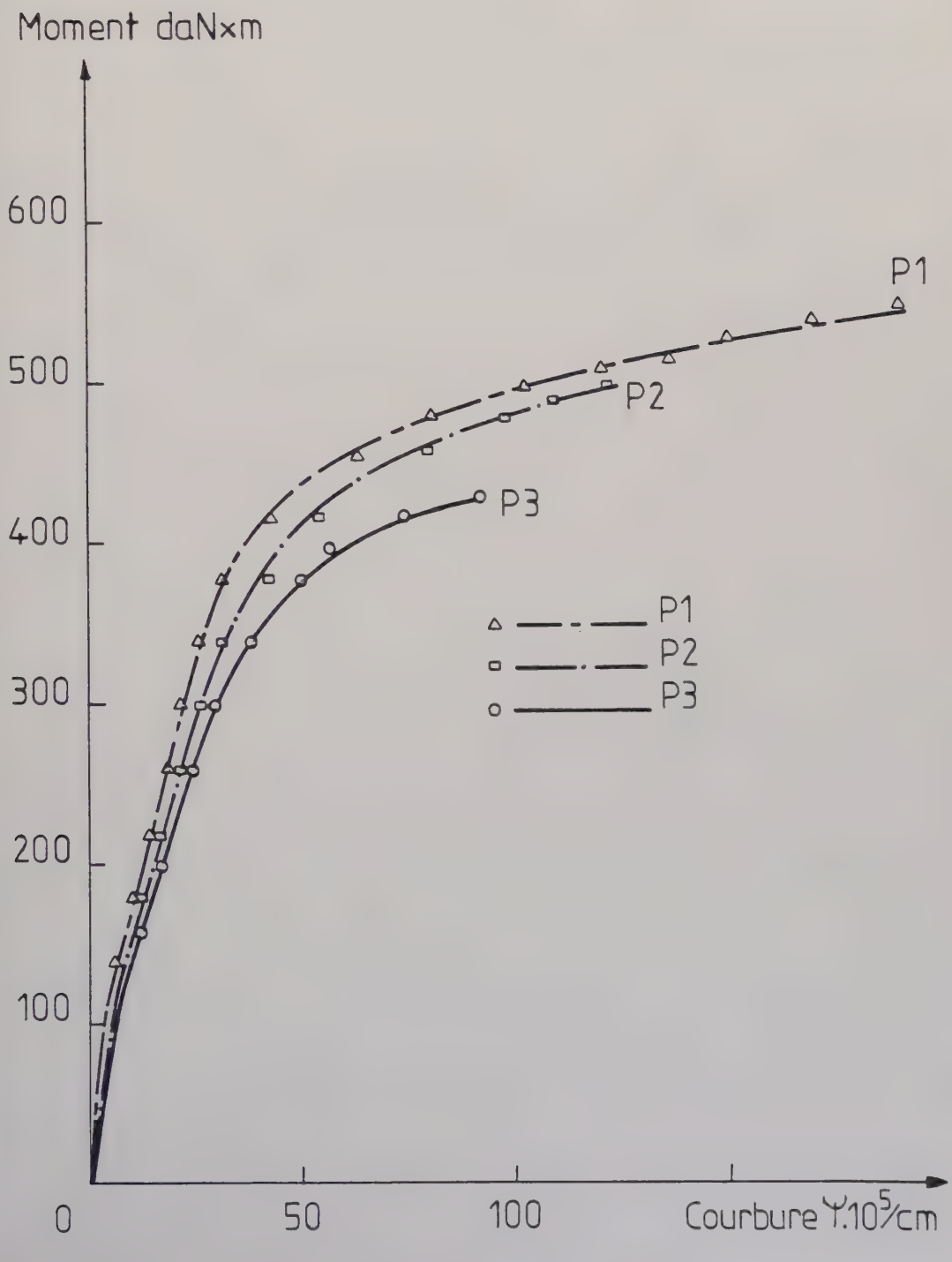


FIGURE II-15: POUTRES "A" ESSAI 7_MOMENT-COURBURE

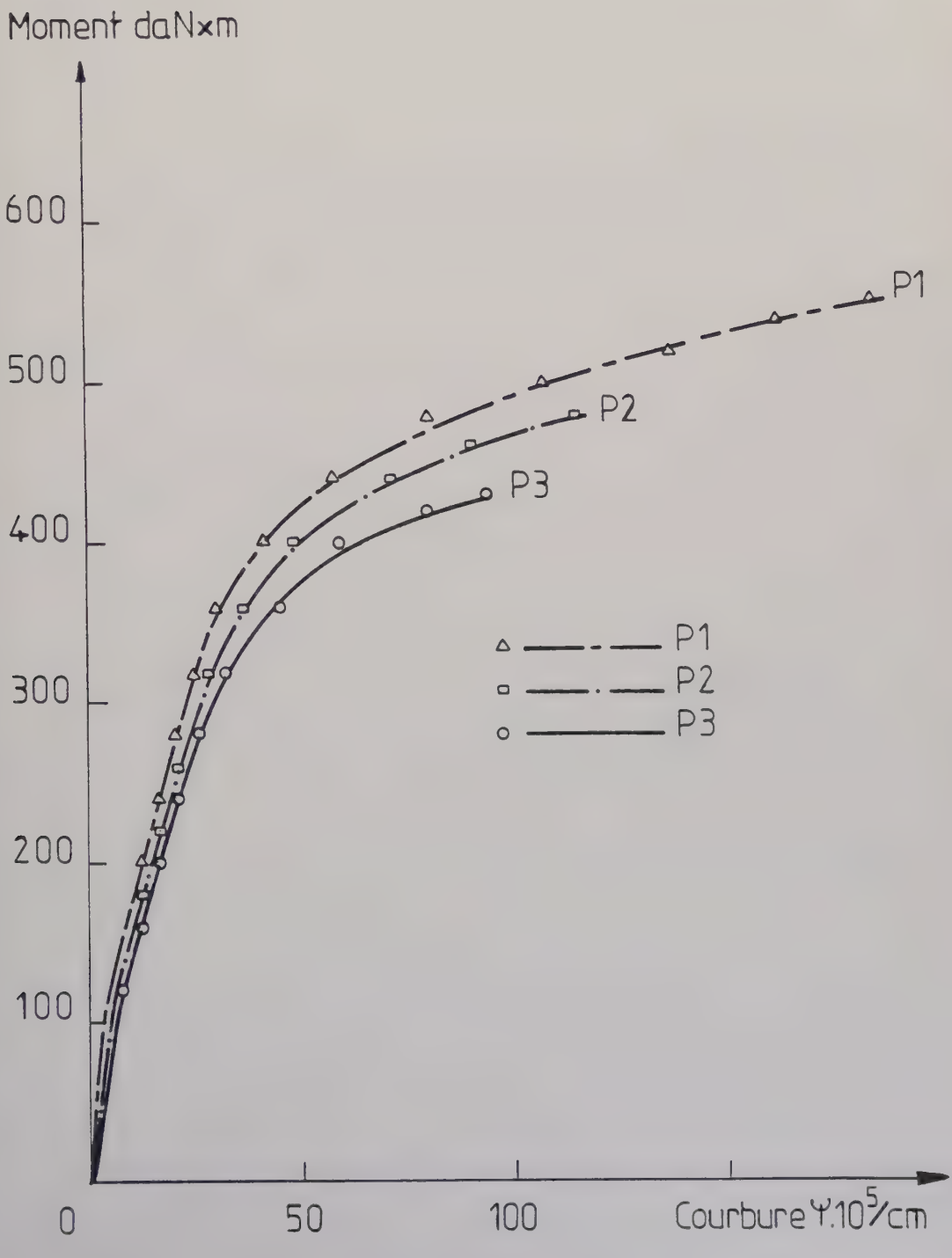
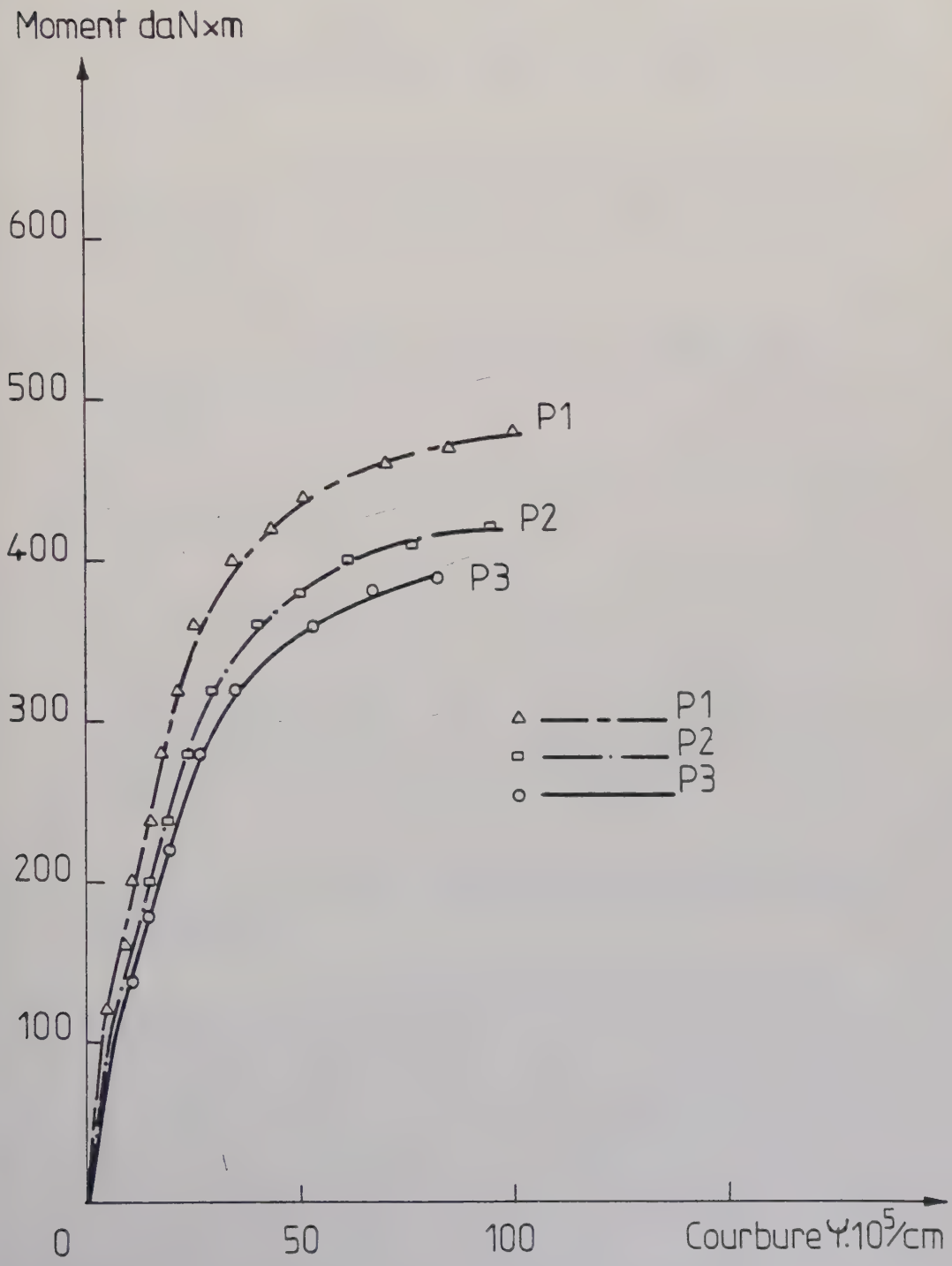


FIGURE II-16 : POUTRES "A" ESSAI 8_MOMENT-COURBURE



Les figures II.1 à II.16 montrent qu'il en est de même pour les systèmes mixtes du point de vue du comportement global. Ainsi sur ces figures on peut distinguer comme indiqué sur la figure ci-dessus :

- la zone I correspondant à l'état "dit" élastique dans laquelle les déformations peuvent être calculées suivant la loi moment-courbure (ou moment-flèche) élastique linéaire en tenant compte de l'hétérogénéité du matériau.

- la zone II correspondant à l'état fissuré dans laquelle l'acier comme le béton non fissuré restent dans le domaine réversible.

- la zone III correspondant à l'état qu'on appelle usuellement état plastique dans laquelle l'acier entre en plasticité.

Ces différentes zones sont elles-mêmes reliées par des zones de transition d'amplitudes relatives variables (AB et CD sur la figure ci-dessus). Enfin on pourrait noter une quatrième zone au-delà du moment de rupture, où les déformations continuent de croître tandis que le moment décroît. Cette zone n'a pas fait l'objet d'une étude systématique lors de nos essais car en réalité nous avons pour notre part constaté que son comportement est très complexe.

II.1.1.1. Comportement des poutres dans la zone "dite" élastique (OA)

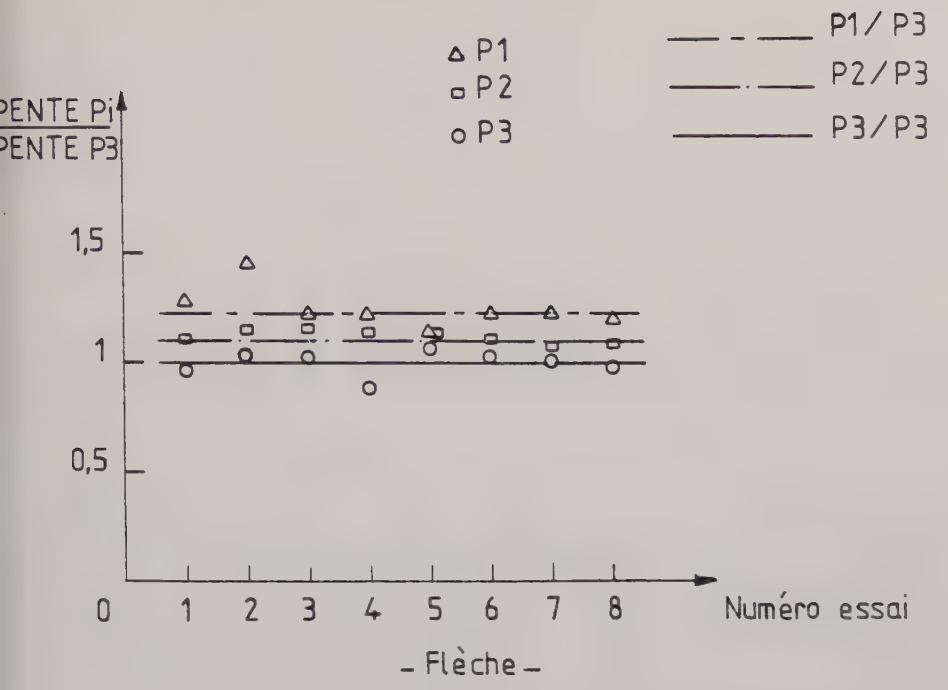
Comme le montrent les figures II.1. à II.16 qui représentent l'évolution des flèches et des courbures de P1, P2 et P3 en fonction du moment appliqué, la fissuration marquant la fin de la zone élastique, se produit pratiquement à une même charge pour toutes les poutres. En effet nous avons observé lors des essais que P1, P2 et P3 se fissurent toutes à une charge voisine de

10 KN correspondant à un moment de 100 daN x m.

Cependant on remarque sur ces figures que dans la zone élastique (OA) la pente des courbes moment - flèche et moment courbure décroît à mesure que la participation de la céramique dans la constitution et (ou) la fabrication de la poutre diminue. Ceci met bien déjà en évidence le rôle de la céramique sur le comportement de la poutre dans la zone élastique.

II.1.1.2. Comportement des poutres dans la zone fissurée

Il apparaît sur les figures II.1. à II.16 que par rapport à la zone élastique, les trois corps d'épreuve P1, P2 et P3 se démarquent plus nettement dans la zone fissurée. La figure II.17 illustre la comparaison des pentes de la partie linéaire BC de P1, P2 et P3 rapportées à celle de P3 et ceci dans le cas des lois moment flèche et moment-courbure pour les essais réalisés. On peut y remarquer que les points représentatifs des différentes poutres restent distincts de façon significative sur les huit séries d'essais et laissent apparaître le classement P1, P2, P3 par ordre de déformabilité croissante (pente décroissante de P1 vers P3). Enfin comme le montre la figure II.18 le moment de plastification moyen limitant supérieurement la zone fissurée (zone BC) est de plus en plus élevé à mesure que la participation de la céramique augmente. Ce phénomène est significatif comme le témoignent les tableaux II.1 et II.2, où on peut constater que l'écart type des résultats expérimentaux est toujours inférieur aux gains enregistrés entre les valeurs moyennes correspondant aux différentes poutres P1, P2 et P3.



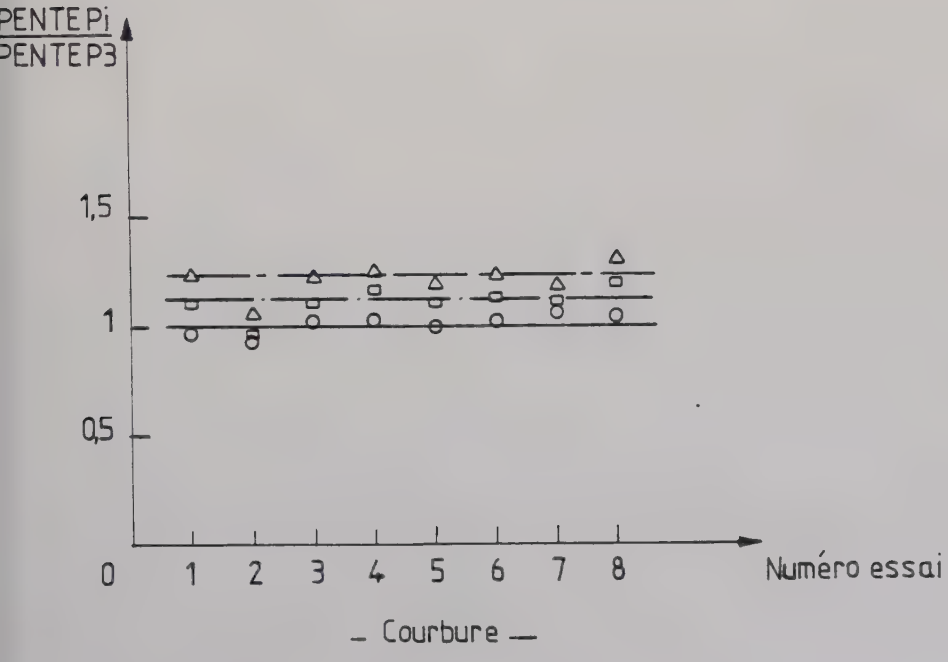
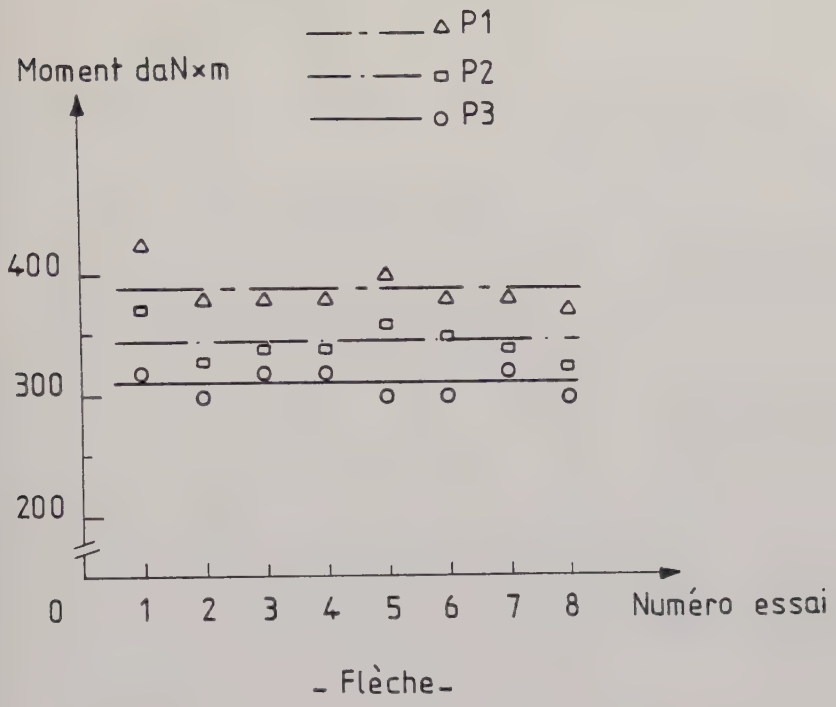


FIGURE II-17:POUTRES"A"_PENTE DE LA PARTIE LINEAIRE BC



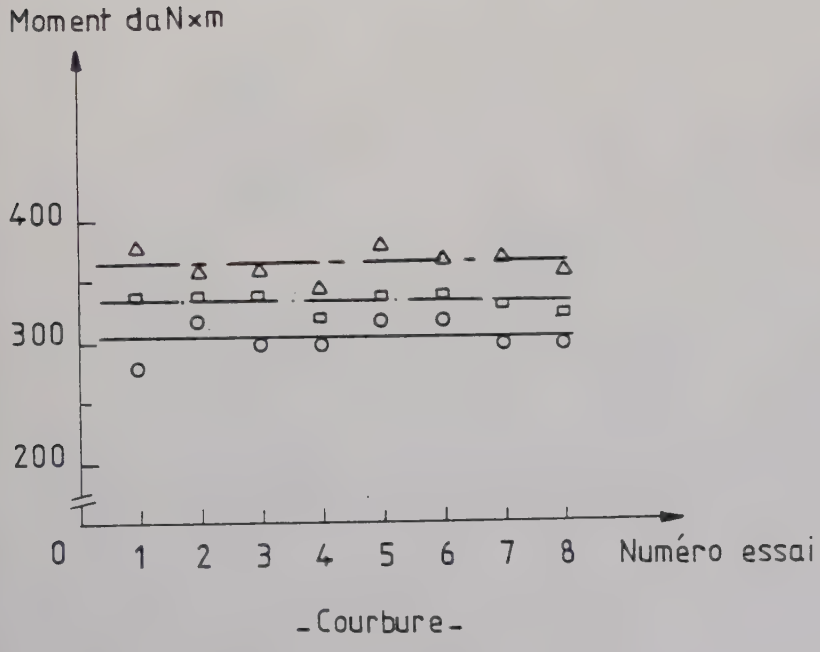


FIGURE II-18: POUTRES "A" - MOMENT DE PLASTIFICATION

	POUTRES		
	P1	P2	P3
Moyenne daN x m	387,5	343,75	310
Ecart type daN x M	13,9	18,6	10
GAINS daN x m			
P1 - P2		43,75	
P2 -P3		33,75	
P1 - P3		77,5	

Tableau II.1. : Moment de plastification Flèche

	POUTRES		
	P1	P2	P3
Moyenne daN x m	365	333,75	305
Ecart type daN x m	11,8	8,56	13,2
GAINS daN x M			
P1 - P2		31,25	
P2 - P3		28	
P1 - P3		60	

Tableau II.2. : Moment de plastification courbure

En conclusion, nous pouvons dire que comme dans la zone élastique, le rôle de la céramique se concrétise dans la zone fissurée par une augmentation de la rigidité de flexion due vraisemblablement à une amélioration des performances du béton et la rigidification latérale par le coffrage céramique qui est un frein à la courbure des poutres.

II.1.1.3. Comportement des poutres dans la zone "dite" plastique (DE)

Comme on peut le constater sur les figures II.1 à II.16, dans cette zone, même si les branches de courbe s'éloignent assez de la linéarité observée dans les précédentes zones, nous retrouvons l'augmentation de la rigidité flexionnelle à mesure que la participation de la céramique s'accroît

II.1.2. Déformations de la face supérieure comprimée des "noyaux" béton

Nous avons également procédé à la comparaison des raccourcissements de la face supérieure comprimée du béton de P1, P2 et P3. Les figures II.19 à II.26 illustrent cette comparaison pour l'ensemble des essais réalisés. On peut remarquer que les courbes obtenues ne correspondent pas tout à fait à l'allure caractéristique observée en II.1.1. Néanmoins on retrouve le classement P1, P2, P3 par ordre de déformation croissante mais cela n'est pas toujours vérifié comme le montrent les figures II.22, II.23, II.24 et II.26. En effet sur les figures II.22 et II.23 les courbes de déformation de P1 et de P2 sont pratiquement confondues tandis que sur la figure II.24 celle de P2 se place nettement à gauche de P1, enfin sur la figure II.26 les trois courbes se confondent. Ces phénomènes peuvent s'expliquer par le caractère local des mesures effectuées, en ce sens que la déformation maximale ne se produit pas forcément toujours à l'endroit où est implantée la jauge de mesure.

FIGURE II-19_POUTRES "A"_ESSAI 1

Déformation de la fibre supérieure de béton

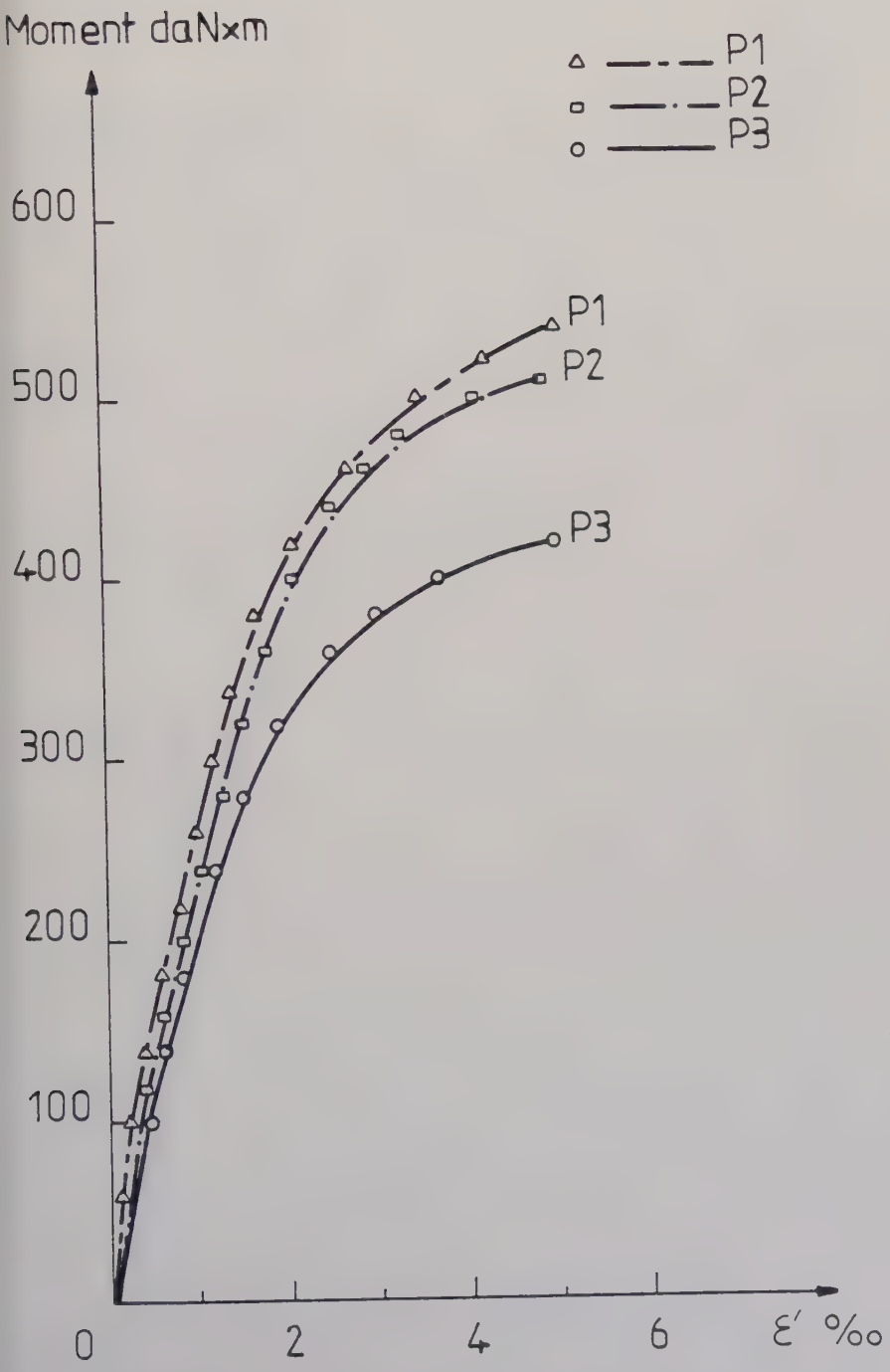


FIGURE II-20_POUTRES "A"_ESSAI 2

Déformation de la fibre supérieure de béton

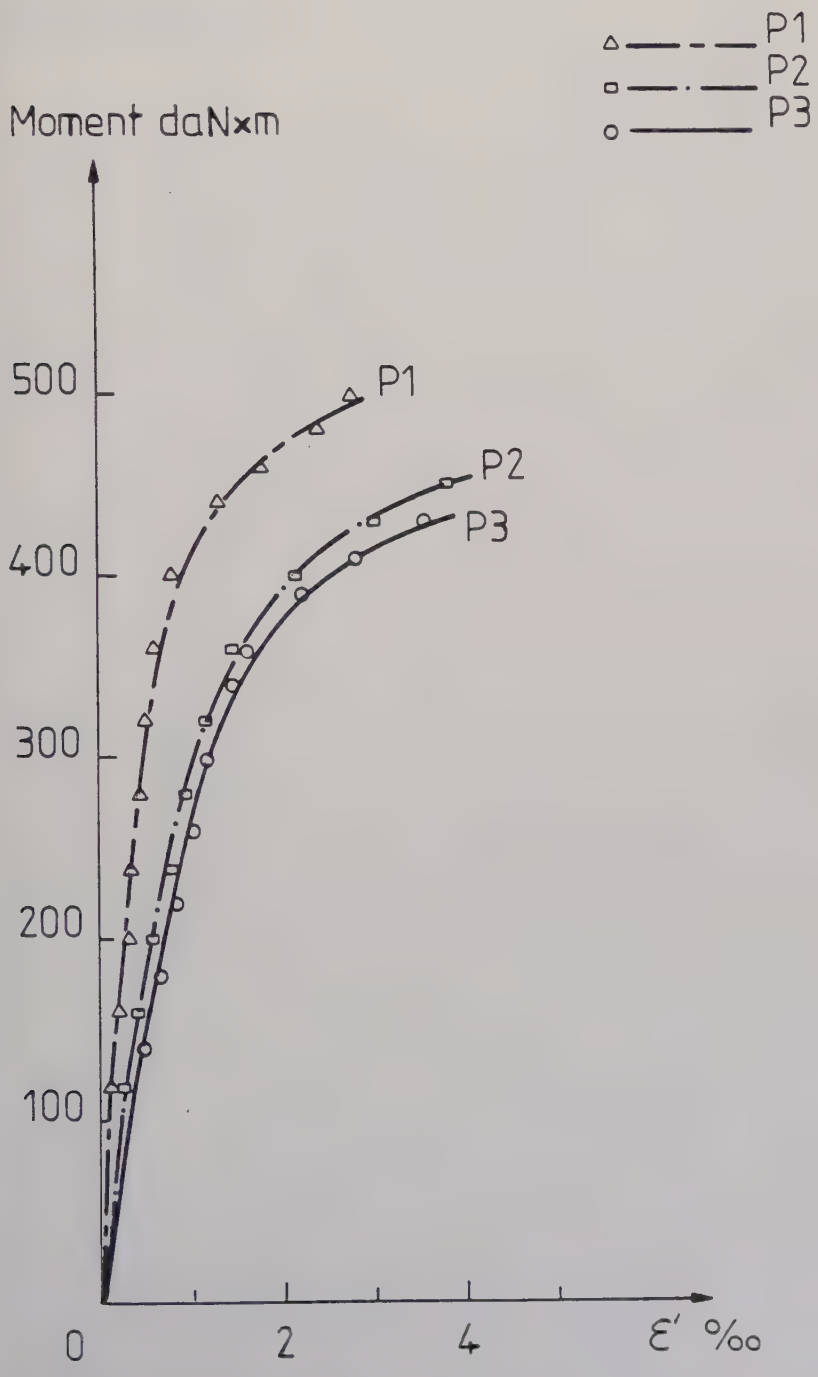


FIGURE II-21_POUTRES "A"_ESSAI 3

Déformation de la fibre supérieure de béton

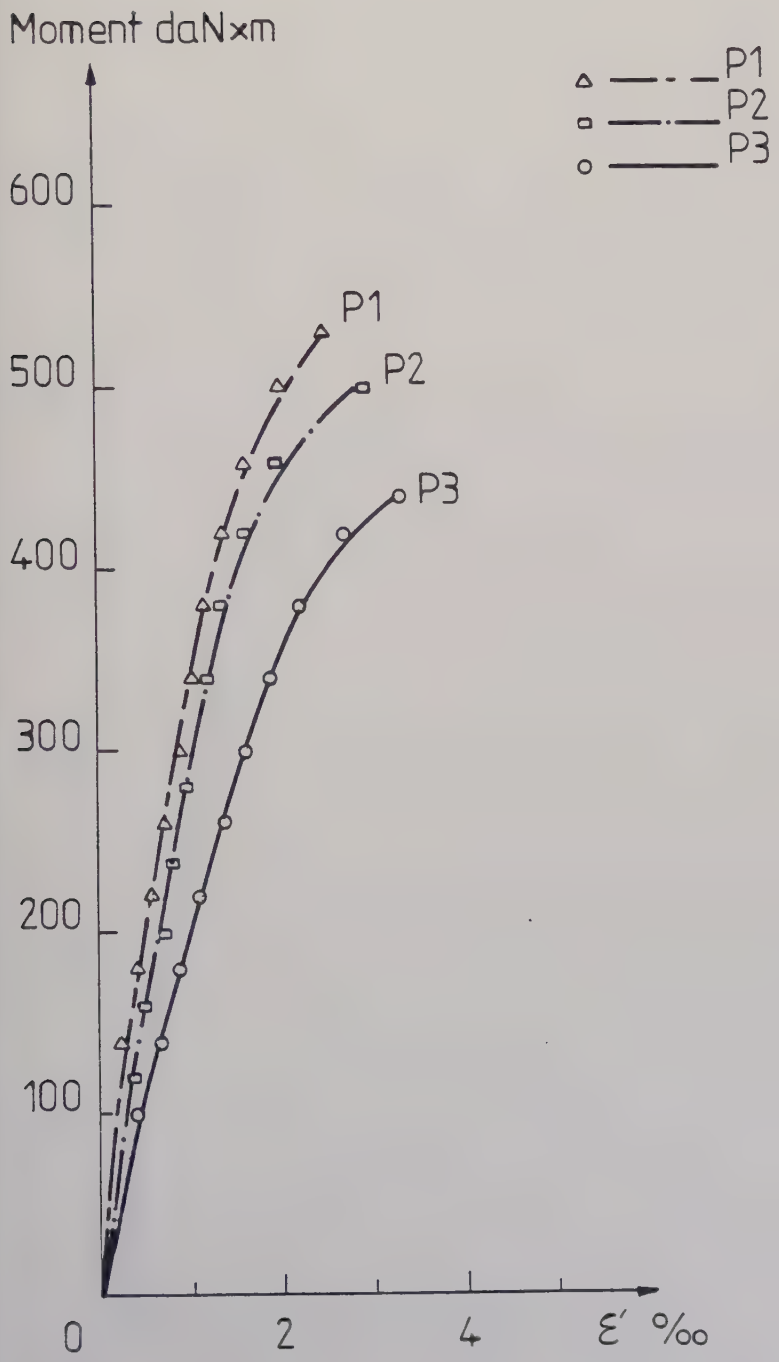


FIGURE II-22_POUTRES "A"_ ESSAI 4

Déformation de la fibre supérieure de béton

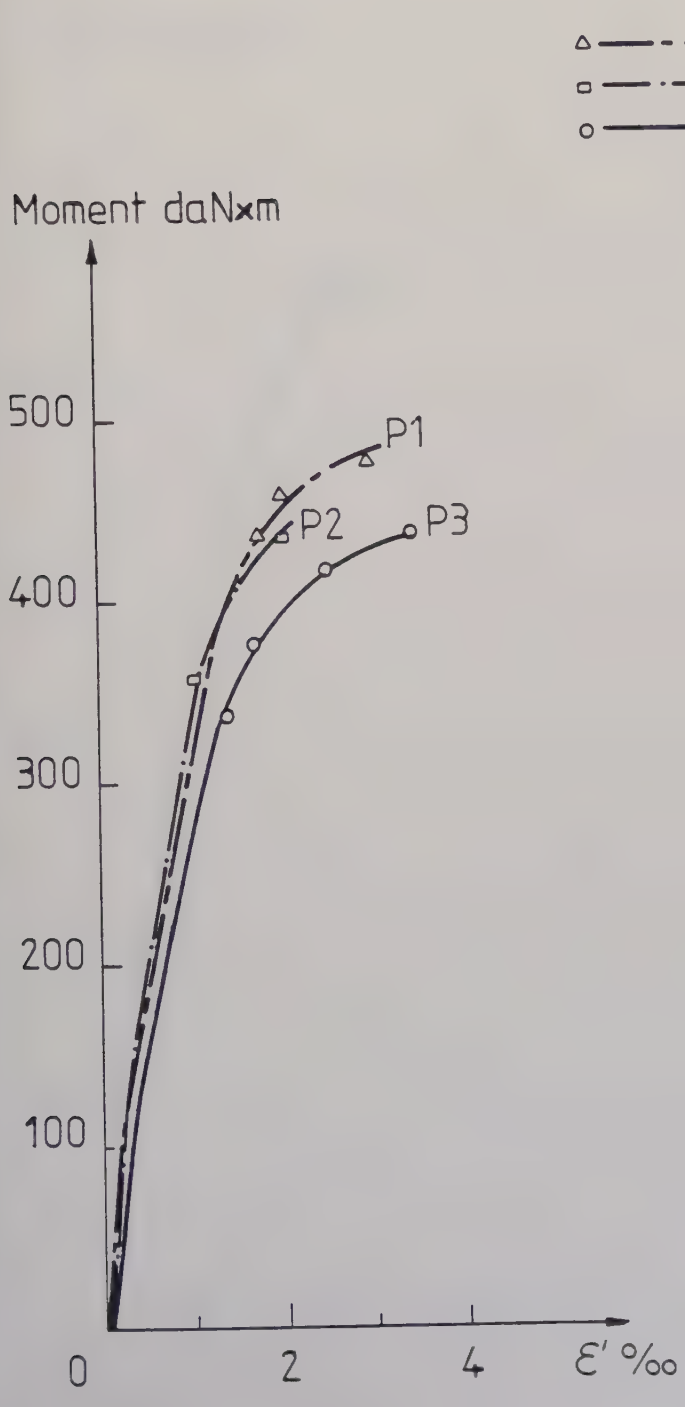


FIGURE II-23_POUTRES "A"_ESSAI 5

Déformation de la fibre supérieure de béton

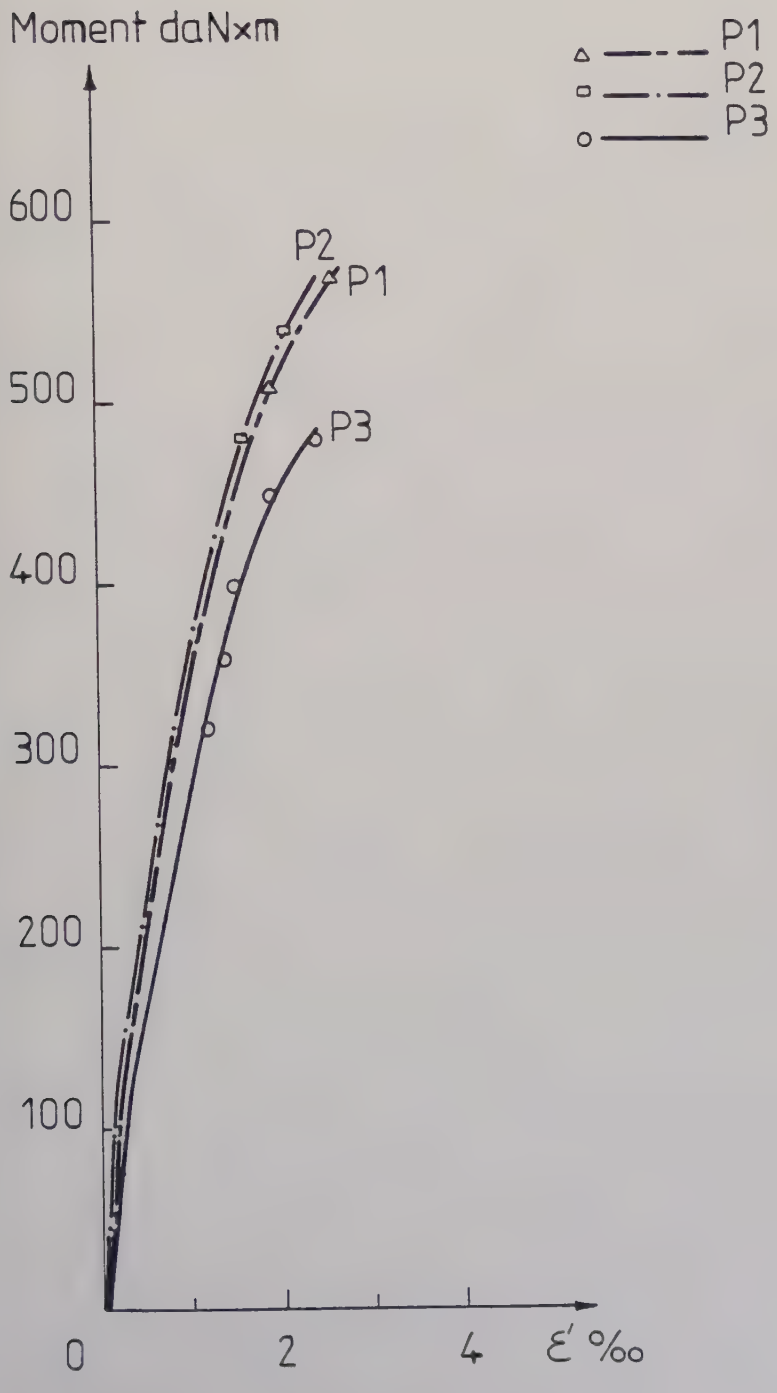


FIGURE II-24_POUTRES "A"_ESSAI 6

Déformation de la fibre supérieure de béton

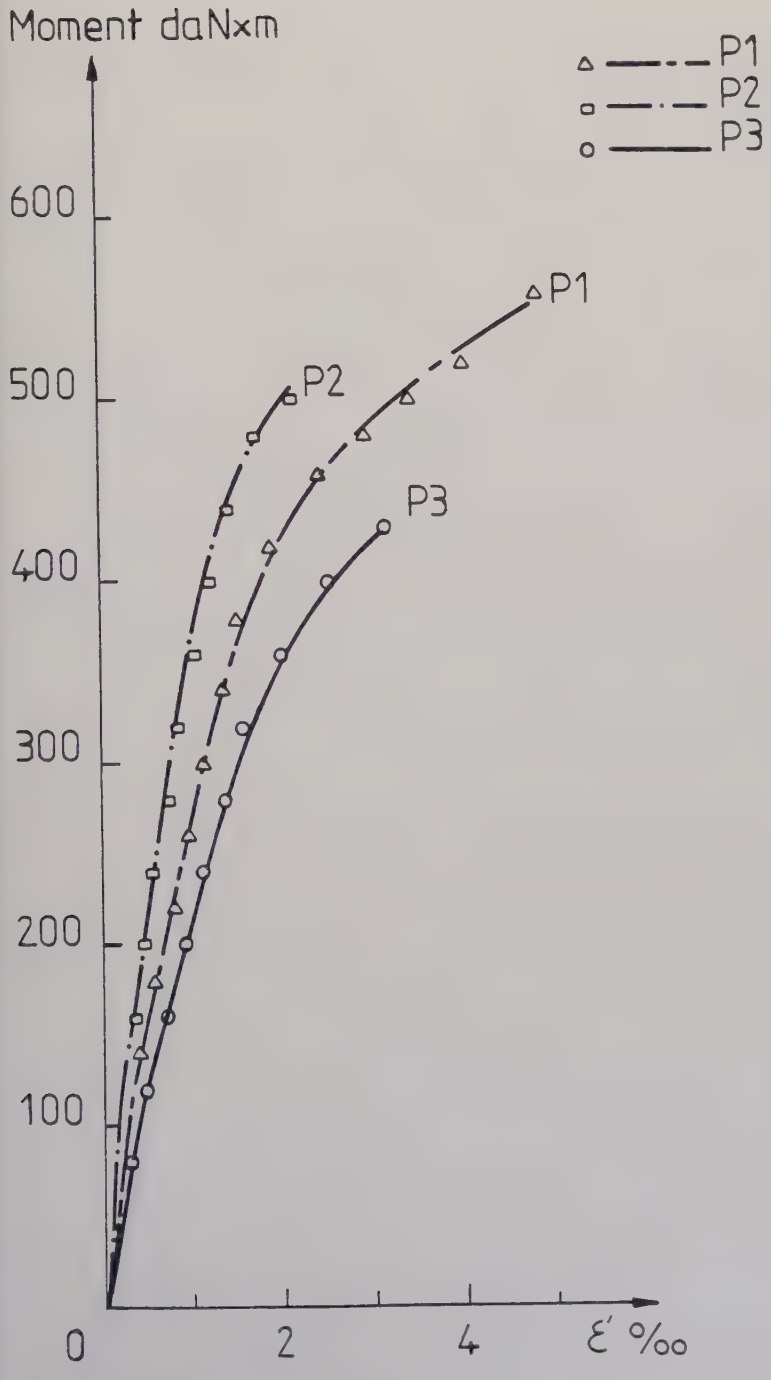


FIGURE II-25_POUTRES "A"_ESSAI 7

Déformation de la fibre supérieure de béton

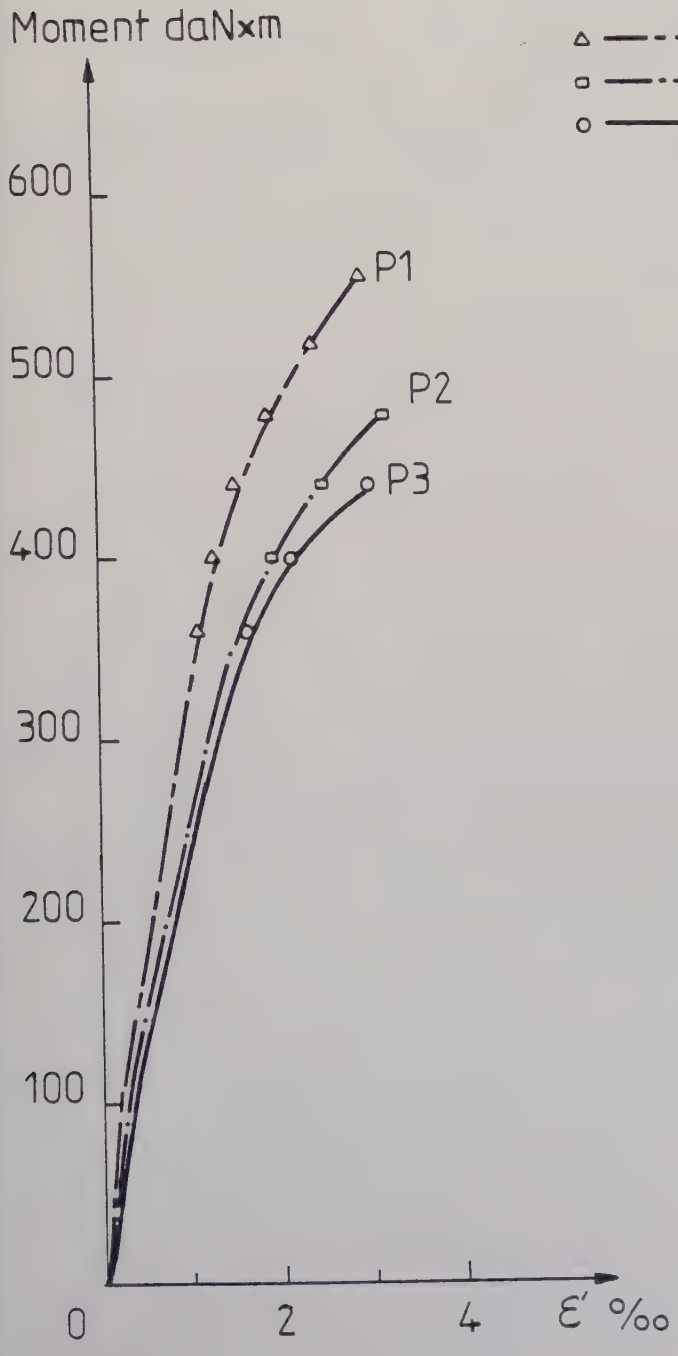
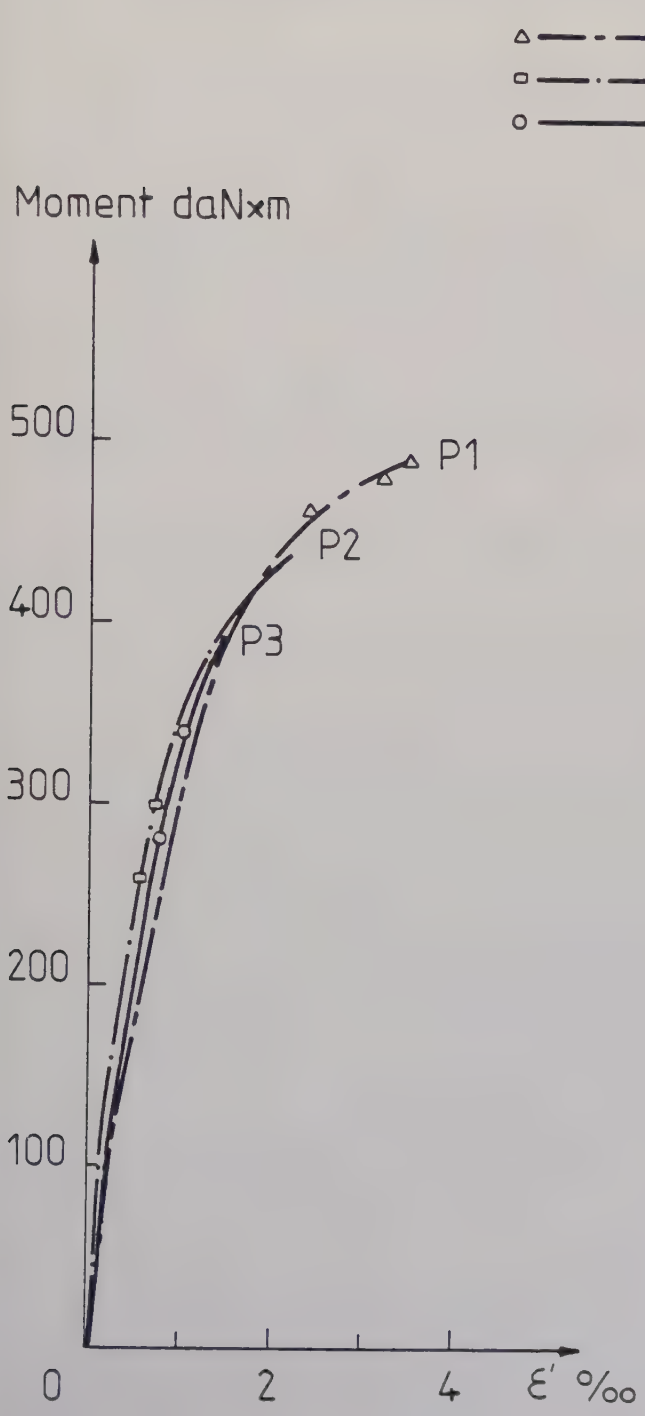


FIGURE II-26_POUTRES "A"_ESSAI 8

Déformation de la fibre supérieure de béton



Cela a d'ailleurs été constaté par de nombreux expérimentaux dont Pinglot (10).

II.2. COMPORTEMENT DES POUTRES AUX ETATS LIMITES D'UTILISATION

Nous définirons tout d'abord un moment de service expérimental pour chacune des poutres P1,P2 et P3. Ensuite nous étudierons les comportements des poutres vis-à-vis de l'état limite de déformation (flèche) qui est le plus couramment vérifié en pratique. Nous le caractériserons par le moment de service théorique déterminé suivant son critère et y comparerons P1, P2 et P3. Enfin pour terminer nous considérerons un cas supplémentaire, moins usuel, qui est celui de l'état limite de réversibilité.

II.2.1. Définition du moment de service expérimental

Nous définissons ce moment de service dans le but de caractériser l'état de service expérimental afin de nous servir ensuite de sa valeur comme référence lors de certaines comparaisons des comportements des poutres. Au stade expérimental, il est difficile de fixer la valeur du moment de service tant qu'on ne connait pas exactement les valeurs des charge permanentes et des surcharges d'exploitation susceptibles d'agir en réalité sur l'élément de structure. Toutefois compte tenu du fait généralement admis qu'en service, il peut y avoir des fissures réversibles dans les éléments de structure nous estimons qu'il est raisonnable de considérer un moment de service expérimental équivalent au moment de fissuration expérimental.

Nous pouvons donc considérer que M serv vaut 100 daN x m, qui est la valeur du moment de fissuration expérimental comme nous l'avons vu en II.1.1.

II.2.2. Comportements des poutres aux états limites d'utilisation

Les deux états limites que nous aovns considérés sont :

- l'état limite de déformation (flèche) qui est le plus fréquemment vérifié en pratique et ;
- l'état limite de réversibilité.

II.2.2.1. Etat limite de déformation

Nous faisons la comparaison des comportements des poutres vis-à-vis de l'état limite de déformation, au niveau des moments de service respectifs de P1, P2 et P3 déterminés suivant son critère défini dans chaque cas d'état limite ultime.

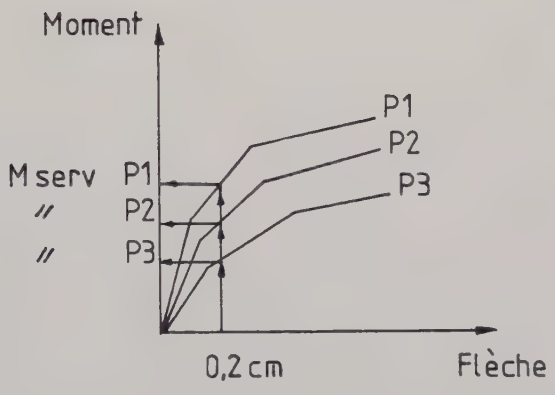
Les déformations sont limitées en fonction de la gêne qu'elles peuvent occasionner à l'exploitation de la construction et des désordres qu'elles peuvent provoquer dans les éléments que cette dernière supporte. En général, l'état limite de déformation est défini par les valeurs admissibles du déplacement d'une section (11). Dans le cas des bâtiments courants, on admet que la flèche maximale d'une section de poutre ne doit pas dépasser :

* $\frac{\ell}{500}$ si la portée ℓ de la poutre est inférieure à 5 m, ce qui est le cas de P1, P2 et P3.

* $0{,}5 \text{ cm} + \frac{\ell\,(\text{cm})}{500}$ si la portée ℓ est supérieure à 5 m. La portée des poutres d'essais P1, P2 et P3 étant $\ell = 1$ m nous déduisons les moments de service respectifs de la premiere condition soit :

$$f_{max} \leq 0{,}2 \text{ cm} \quad (1)$$

Pour obtenir la valeur de Mserv nous reportons 0,2cm sur le diagramme moment-flèche de la poutre considérée et nous opérons comme indiqué sur la figure ci-dessous.



Ainsi, nous avons déterminé les moments de service Mserv de P1, P2 et P3 respectivement et ceci pour l'ensemble des essais. Les valeurs de ces moments de service sont consignées dans le tableau II.3.

$M_{serv\ théorique}$ (da N x m)				Ecart %		
Numéro Essai	P1	P2	P3	P1 - P2	P2 - P3	P1 - P3
				⋆17,125 □ = 1,96	⋆ 16 □ = 2,99	⋆ =30,55 □ =2,94
1	200	160	130	20	18,75	35
2	220	180	150	18	16,7	32
3	190	160	140	16	12,5	26,3
4	190	160	130	16	18,75	31,6
5	200	170	140	15	17,6	30
6	200	160	140	20	12,5	30
7	190	160	140	16	12,5	26,3
8	190	160	130	16	18,75	31,6

Tableau II.3

Dans le tableau II.3. on peut remarquer que le moment de service décroît à mesure que la présence de la céramique dans la constitution et (ou) la fabrication de la poutre est moins importante. Ceci met en évidence le rôle favorable de la céramique qui se traduit ainsi par une augmentation du moment de service et par conséquent augmente la sécurité vis-à-vis de l'état limite de déformation. Il est à noter également que pour les trois poutres P1, P2 et P3, le moment de service reste supérieur au moment de service expérimental dé-

⋆ moyenne

□ Ecart type

fini en II.2.1. et correspondant au moment de fissuration de 100 daNxm

Enfin l'observation des écarts enregistrés dans le tableau II.3 permet d'affirmer raisonnablement que vis-à-vis de l'état limite de déformation, la céramique apporte à :

- P1 un gain de 17 % par rapport à P2 ;
- P2 un gain de 16 % par rapport à P3 ;
- P1 un gain de 30 % par rapport à P3.

II.2.2.2. Etat limite de réversibilité

Afin de mettre en évidence le rôle de la céramique sur la réversibilité des différentes pièces, nous avons considéré l'état limite de réversibilité dont la vérification est certes assez peu usuelle en pratique mais présentant l'intérêt de nous permettre de multiplier les domaines de comparaison et de saisir ainsi l'aspect fondamental du comportement des pièces.

Dans un souci de clarté il nous a semblé judicieux de faire la comparaison des comportements de P1, P2 et P3 sur la base du "moment limite de réversibilité". Ce moment limite de réversibilité correspond par notre définition au moment à partir duquel il y a des déformations ou des déplacements résiduels soit un degré de réversibilité inférieur à 100 %.

Nous rappelons que le degré de réversibilité R est déterminé par les relations suivantes :

$$R_{def} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_r}{\varepsilon_t} \times 100\ \% \text{ pour les déformations}$$

et

$$R_{dep} = \frac{\delta_t - \delta_r}{\delta_t} \times 100\ \% \text{ pour les déplacements}$$

Dans ces formules, les symboles ont les significations suivantes :

ε_r = déformation résiduelle
ε_t = déformation totale
δ_r = déplacement résiduel
δ_t = déplacement total

A l'aide des relations ci-dessus nous avons calculé les degrés de réversibilité respectifs de la flèche, du raccourcissement de la fibre supérieure du béton et de l'allongement de la fibre inférieure ; ensuite nous en avons déduit les "moments limites de réversibilité" de P1, P2 et P3 respectivement.

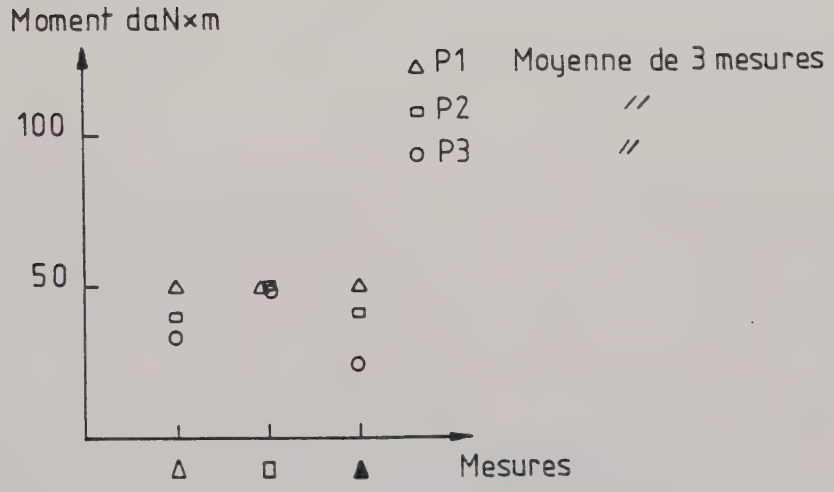
La figure II.27 illustre la comparaison de ces moments. On peut remarquer sur cette figure que globalement la limite de réversibilité décroît à mesure que la participation de la céramique dans la constition et (ou) la fabrication de la poutre diminue, en d'autres termes le "moment limite de réversibilité décroît de P1 à P3 et cela dans le cas des déformations comme dans celui de la flèche.

Nous signalerons toutefois le nombre relativement limité des essais et la dispersion qui pourrait en résulter.

II.3. COMPORTEMENT DES POUTRES A LA RUPTURE

II.3.1. Moments de rupture expérimentaux : Mr

La figure II.28 illustre la comparaison des moments de rupture expérimentaux de P1, P2 et P3 pour l'ensemble des essais effectués. On peut y remarquer le classement P1, P2, P3, par ordre de moment de rupture décroissant, ce qui confirme que la résistance de la poutre diminue à mesure que la participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication décroît.



△ Flèche

▫ Raccourcissement de la fibre supérieure de béton

▲ Allongement de la fibre inférieure de béton

FIGURE II-27_ POUTRES "A"_ LIMITES DE REVERSIBILITE

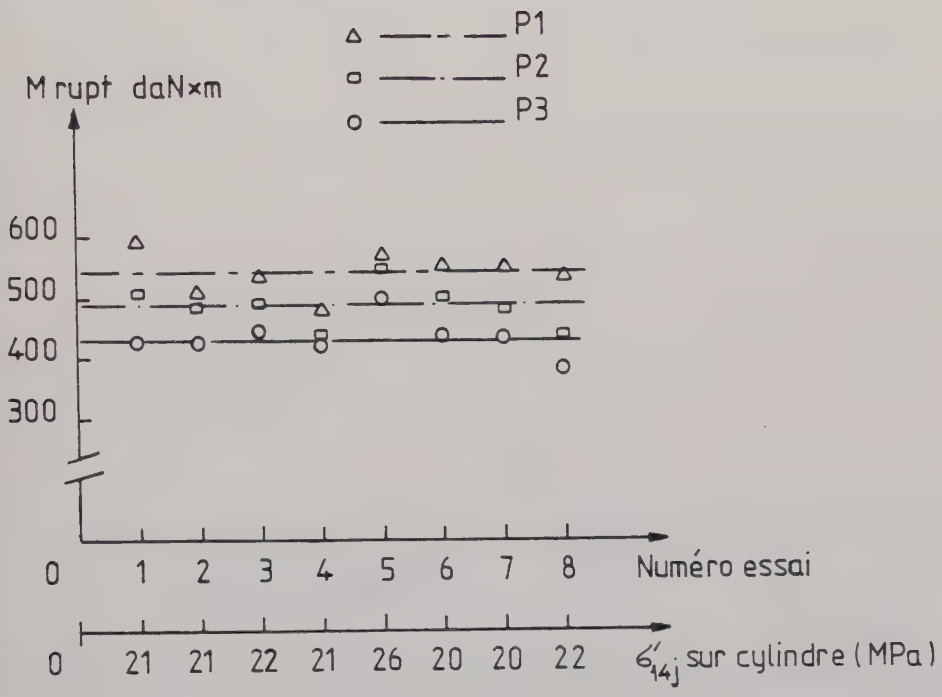


FIGURE II-28_POUTRES "A"_MOMENTS DE RUPTURE

Sur la base de la figure II.28 on peut affirmer que vis-à-vis de la rupture

- P1 est renforcée de 9% par rapport à P2 ;
- P2 est renforcée de 12% par rapport à P3 et
- P1 est renforcée de 21% par rapport à P3.

II.3.2. Calcul du moment de rupture de la poutre composite P1

Nous calculons la valeur théorique du moment de rupture de la poutre composite P1 à l'aide de la formule proposée par les normes britanniques relatives à la maçonnerie armée (4). Ensuite nous comparons le résultat de ce calcul à la valeur du moment de rupture expérimental afin de pouvoir porter un jugement sur la validité de la formule utilisée.

Ces normes britanniques (4) proposent pour le calcul du moment résistant d'une poutre composite céramique - béton armé la formule suivante :

$$M_d = \frac{0{,}3.b.d^2.1{,}5 f'_k}{\gamma_{mm}} \qquad (1)$$

Cette formule repose sur l'hypothèse d'un diagramme de contrainte semi-parabolique de la zone comprimée, en plus de celles usuellement admises pour le calcul classique du béton armé (11).

Dans la relation (1) les symboles utilisés ont les significations suivantes :

M_d = moment résistant de la section

b = largeur de la section mixte de la poutre

d = hauteur utile

f'_k = résistance caractéristique en compression de l'éprouvette mixte.

Le facteur 1,5 est introduit pour tenir compte du fait que la résistance en compression par flexion est supérieure à celle en compression simple.

γ_{mm} = coefficient de sécurité partielle pour la résistance de la maçonnerie en compression. Ses valeurs sont données dans (4) en fonction de la catégorie de construction (normale ou spéciale) et des conditions de fabrication des éléments de maçonnerie (contrôle normal ou spécial)
Le moment de rupture se calcule en prenant $\gamma_{mm} = 1$
La relation (1) nous donne alors

$$M_r = 0,3\ b.d^2.\ 1,5\ .\ f'_k \qquad (2)$$

Soit avec b = 12 cm
d = 8 cm
f'_k = 189 daN/cm2

$$M_r = 653 \text{ daN x m}$$

Cette valeur est plus élevée de 17,3 % par rapport à la valeur expérimentale de 540 daN x m. On peut penser que le coefficient 1,5 de la relation (1) est trop élevé dans le cas spécifique qui nous concerne d'autant plus que les éléments céramiques ayant fait l'objet d'essais par les beitanniques (4) devaient avoir une

plus grande résistance en compression que les petits claustras que nous avons utilisés. Nous proposons alors de prendre un coefficient de 1,25 au lieu de 1,5, ce qui donne

$$M_r = 544 \text{ daN x m}$$

Cette dernière valeur est pratiquement égale au moment de rupture expérimental de 540 daN x m, l'écart n'est que de 0,7%.

En conclusion on peut donc affirmer que la formule de la B.C.R.A. (4) permettrait de prédire le moment de rupture de la poutre composite P1 avec une très bonne précision à la condition de savoir apprécier la valeur du coefficient qui tient compte du fait que la résistance en compression par flexion est supérieure à celle en compression simple (1,5 dans la relation (1))

II.4 CONCLUSIONS

1/ Les résultats de nos essais ont montré que les performances des poutres augmentent à mesure que la participation de la céramique dans leur constitution et (ou) leur fabrication s'accroît. Ce phénomène se retrouve aussi bien à l'état limite d'utilisation qu'à l'état limite de rupture.

Vis-à-vis de l'état limite d'utilisation (déformation de flèche) les taux d'amélioration relative des moments de service de P1, P2, et P3 sont consignés dans le tableau II.4

	Accroissement de Mserv
P1 - P2	17
P2 - P3	16
P1 - P3	30

Tableau II.4

Vis-à-vis de l'état limite de rupture ces taux d'accroissement sont ceux donnés dans le tableau II.5

	Accroissement de Mr
P1 - P2	9
P2 - P3	12
P1 - P3	21

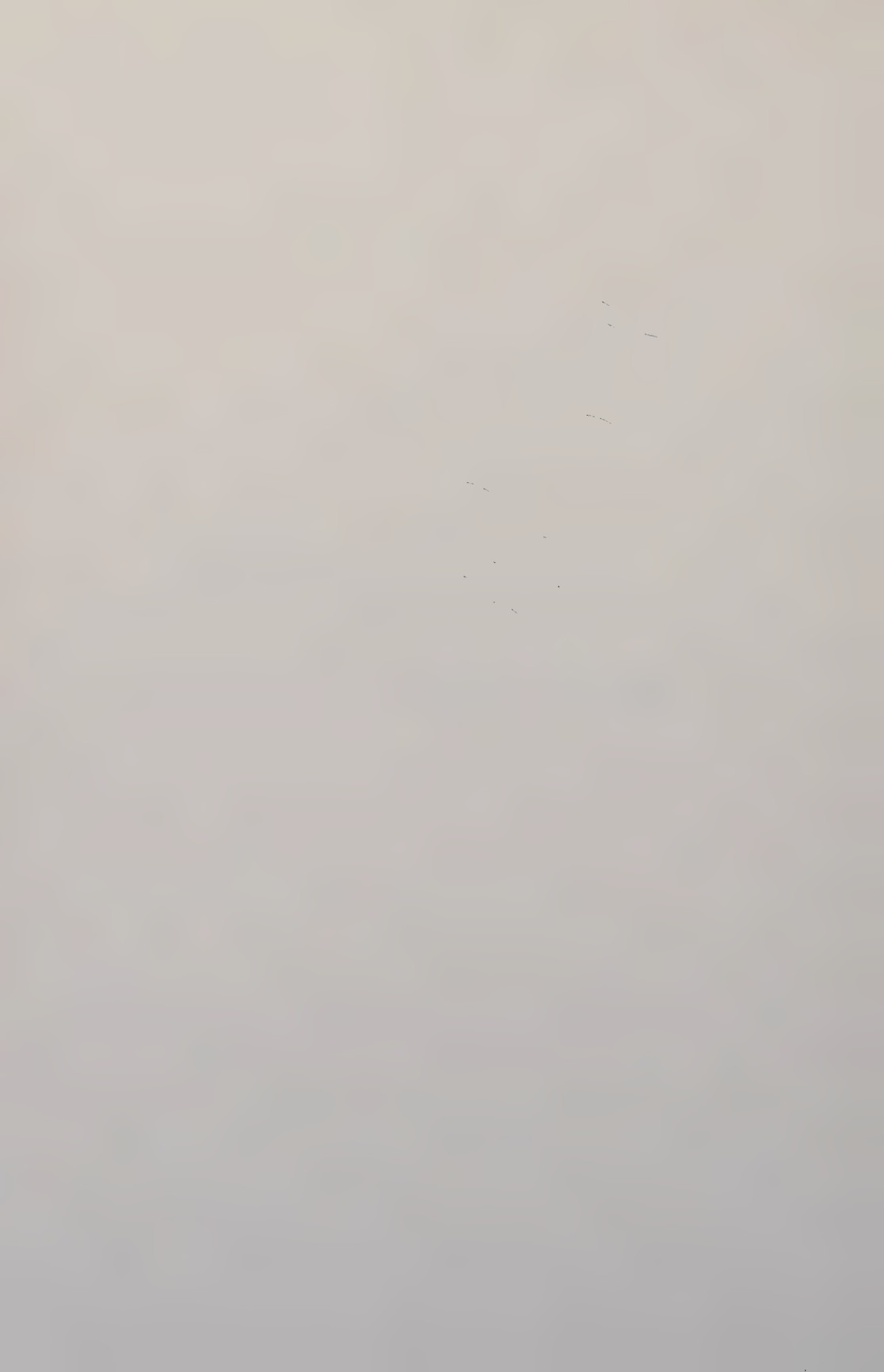
Tableau II.5

2/ La formule proposée par la B.C.R.A. ⋆ (4) permet de calculer le moment de rupture de la poutre composite P1 avec une précision satisfaisante, à la condition toutefois de l'aménager en remplaçant le coefficient 1,5 par 1,25 dans la relation (2) du paragraphe II.3.2.

⋆ B.C.R.A. : The British Ceramic Research Association.

CHAPITRE III

RESULTATS POUTRES "B"



CHAPITRE III
RESULTATS POUTRES "B"

Au chapitre précédent, la synthèse des résultats concernant les poutres à échelle réduite (Poutres "A") a permis d'établir que la performance du linteau (ou de la poutre) est d'autant plus élevée que la participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication est importante.

Dans ce troisième chapitre nous présentons et analysons les résultats concernant les poutres de dimensions normales (poutres "B"). Les essais effectués sur ces poutres sont destinés nous le rappelons, à vérifier si les phénomènes observés sur les poutres à échelle réduite (poutres "A") se retrouvent à grande échelle et s'il y a un éventuel effet d'échelle.

C'est pourquoi nous analyserons les résultats de ces poutres de dimensions normales (poutres "B") suivant un plan identique à celui adopté pour les poutres à échelle réduite (poutres "A").

Ainsi le premier paragraphe est consacré à la description détaillée de l'allure caractéristique des courbes représentant les lois moment-courbure et moment-flèche ainsi qu'à celle de la loi moment-déformation des trois corps d'épreuve P1, P2 et P3. Ensuite comme au chapitre II, en nous plaçant dans les différents états successifs rencontrés lors decette description (état "dit" élastique, état fissuré et état "dit" plastique) nous procédons à la comparaison systématique des comportements de P1,P2 et P3.

Au second paragraphe, nous comparons également les comportements de P1, P2 et P3 vis-à-vis de l'état limite d'utilisation (déformation et réversibilité).

Le troisième paragraphe est consacré à la comparaison des comportements de P1, P2 et P3 vis-à-vis de l'état limite de rupture. D'une part nous comparons leurs moments de rupture expérimentaux respectifs, d'autre part, nous déterminons le moment de rupture théorique du linteau composite P1 par la formule proposée par la B.C.R.A. (4). Nous comparons ensuite le moment de rupture théorique ainsi obtenu, au moment de rupture expérimental de P1, ce qui nous permettra encore une fois de porter un jugement sur la validité de la formule utilisée.

Enfin au quatrième et dernier paragraphe nous tirons les conclusions de ces résultats eu égard à ceux du chapitre II concernant les poutres à échelle réduite (poutres "A").

III.1. ALLURE CARACTERISTIQUE DES COURBES OBTENUES

III.1.1. Lois : Moment flèche et moment-courbure

Sur les figures III.1. à III.3. représentant les variations des flèches centrales de P1, P2 et P3, en fonction du moment appliqué, on peut remarquer que l'allure des courbes de la loi: moment-flèche est pratiquement identique à celle décrite en II.1.1. (allure trilinéaire). Par contre les figures III.4 à III.6 représentant les variations des courbures des différentes pièces en fonction du moment appliqué, montrent que la loi : moment - courbure de P1, P2, et P3 ne correspond pas à une configuration trilinéaire, ou du moins s'en éloigne-t-elle remarquablement.

FIGURE III-1_POUTRES "B"_ESSAI 1_FLECHE-CHARGE

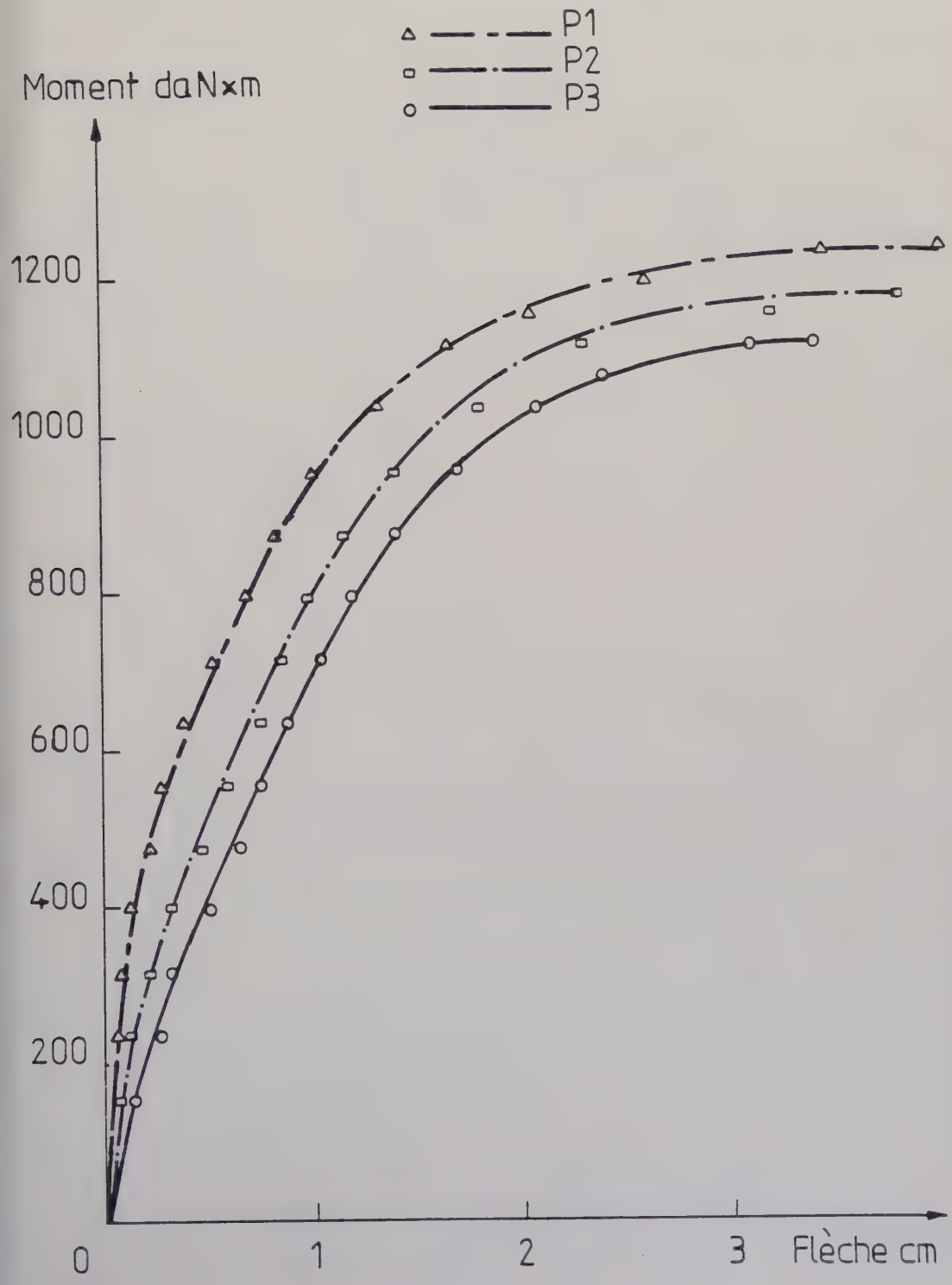


FIGURE III-2_POUTRES "B"_ESSAI 2_FLECHE-CHARGE

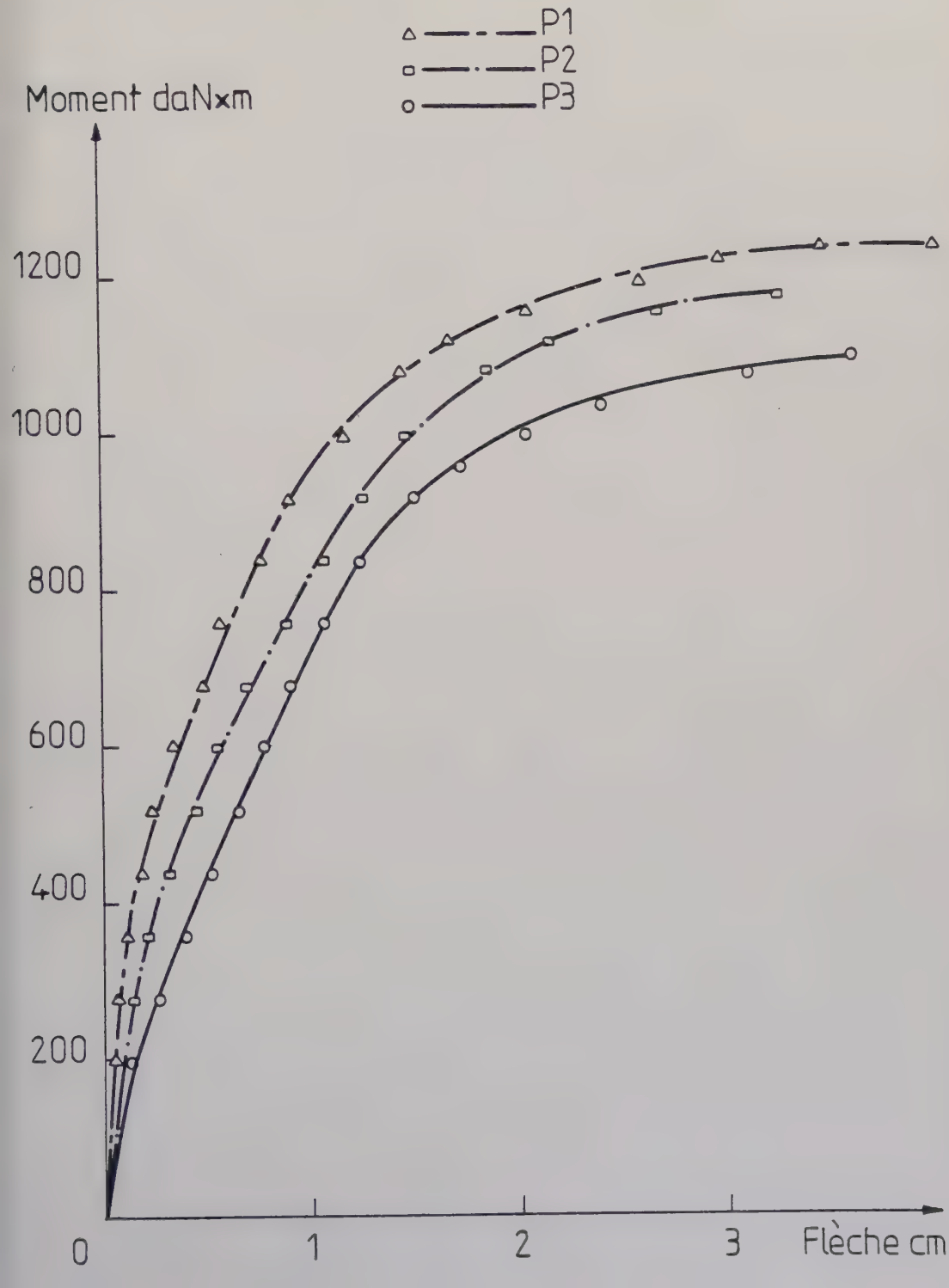


FIGURE III-3_POUTRES"B"_ESSAI 3_FLECHE-CHARGE

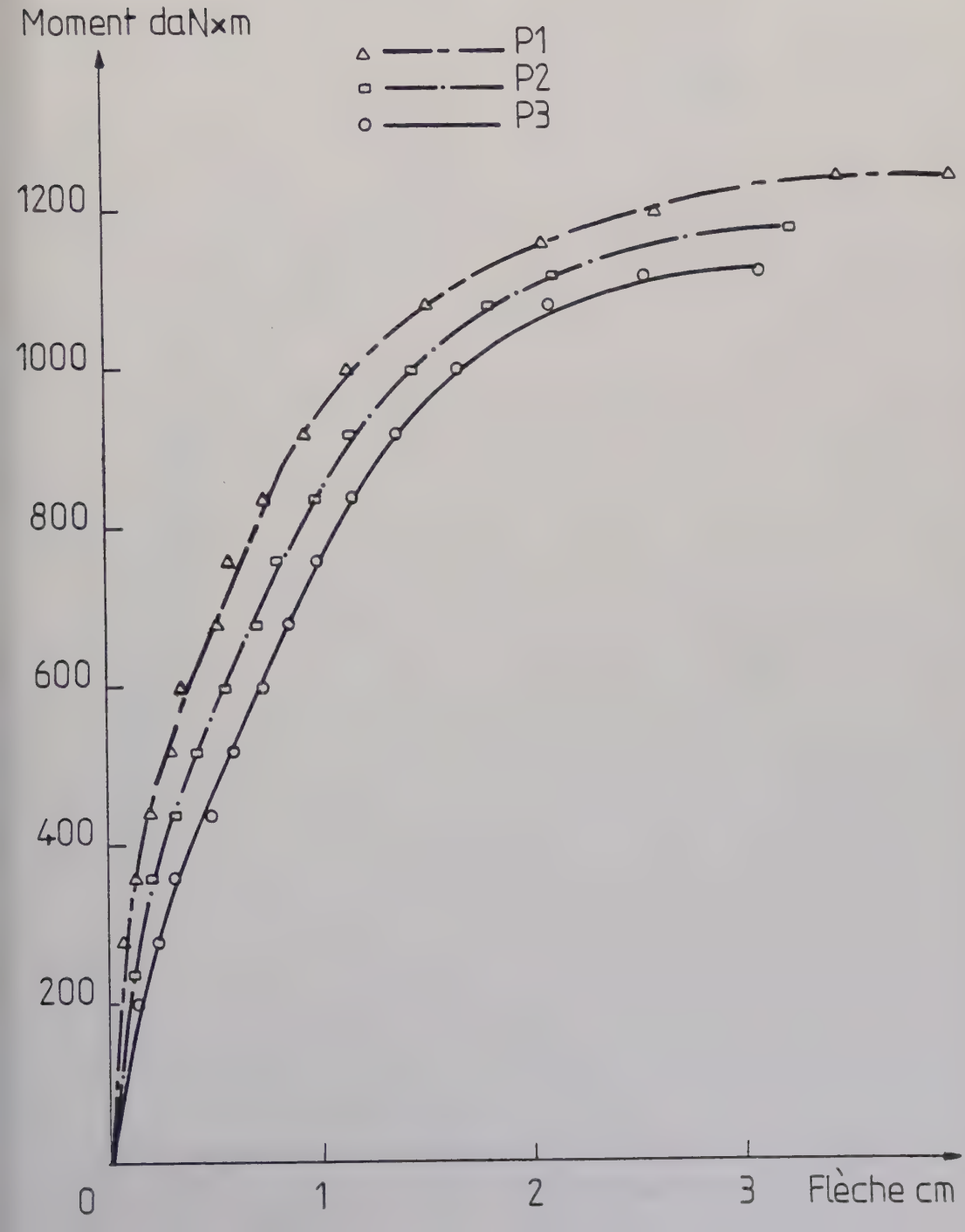


FIGURE III-4_POUTRES "B"_ESSAI 1_MOMENT-COURBURE

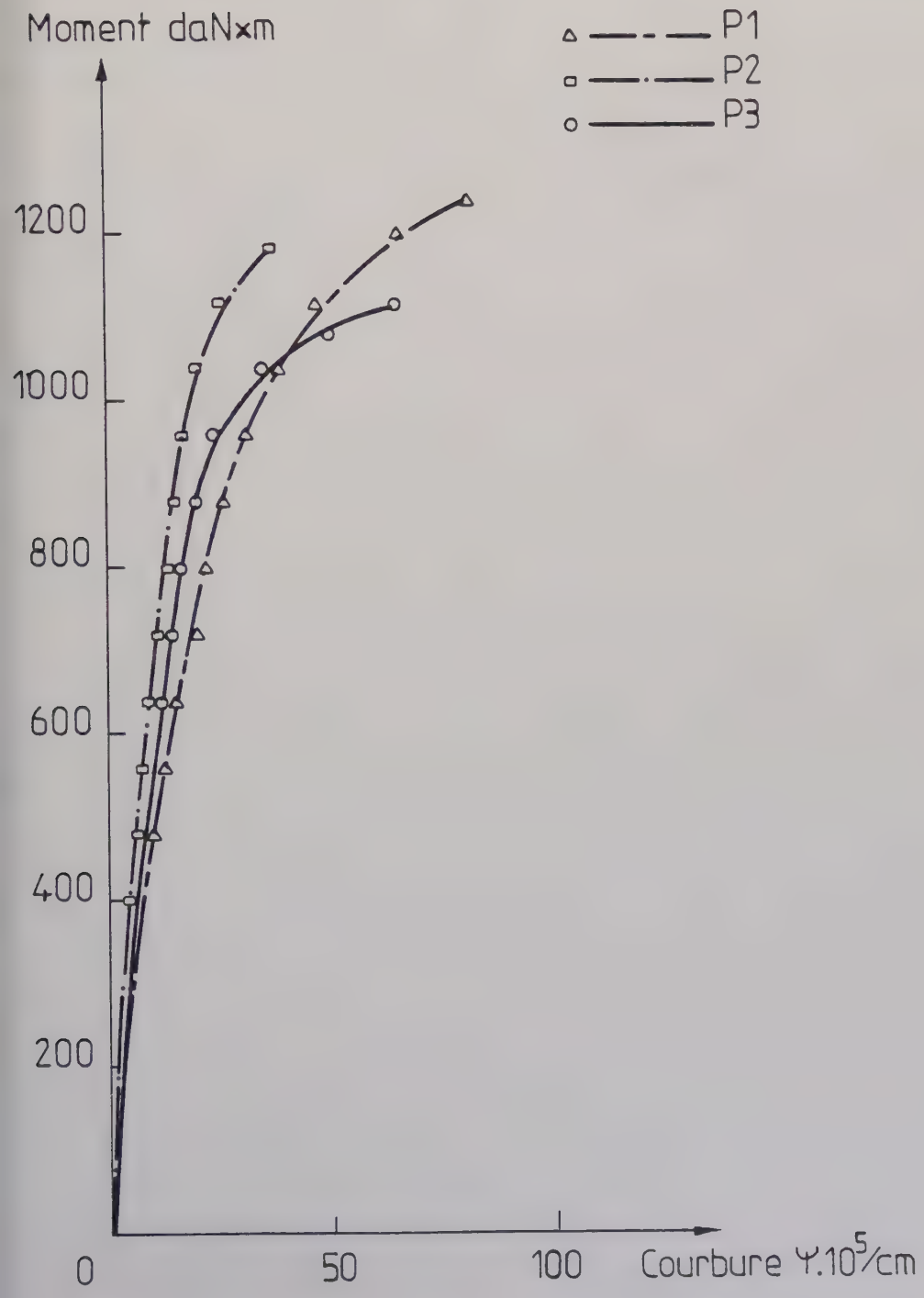


FIGURE III-5_POUTRES"B"_ESSAI 2_MOMENT-COURBURE

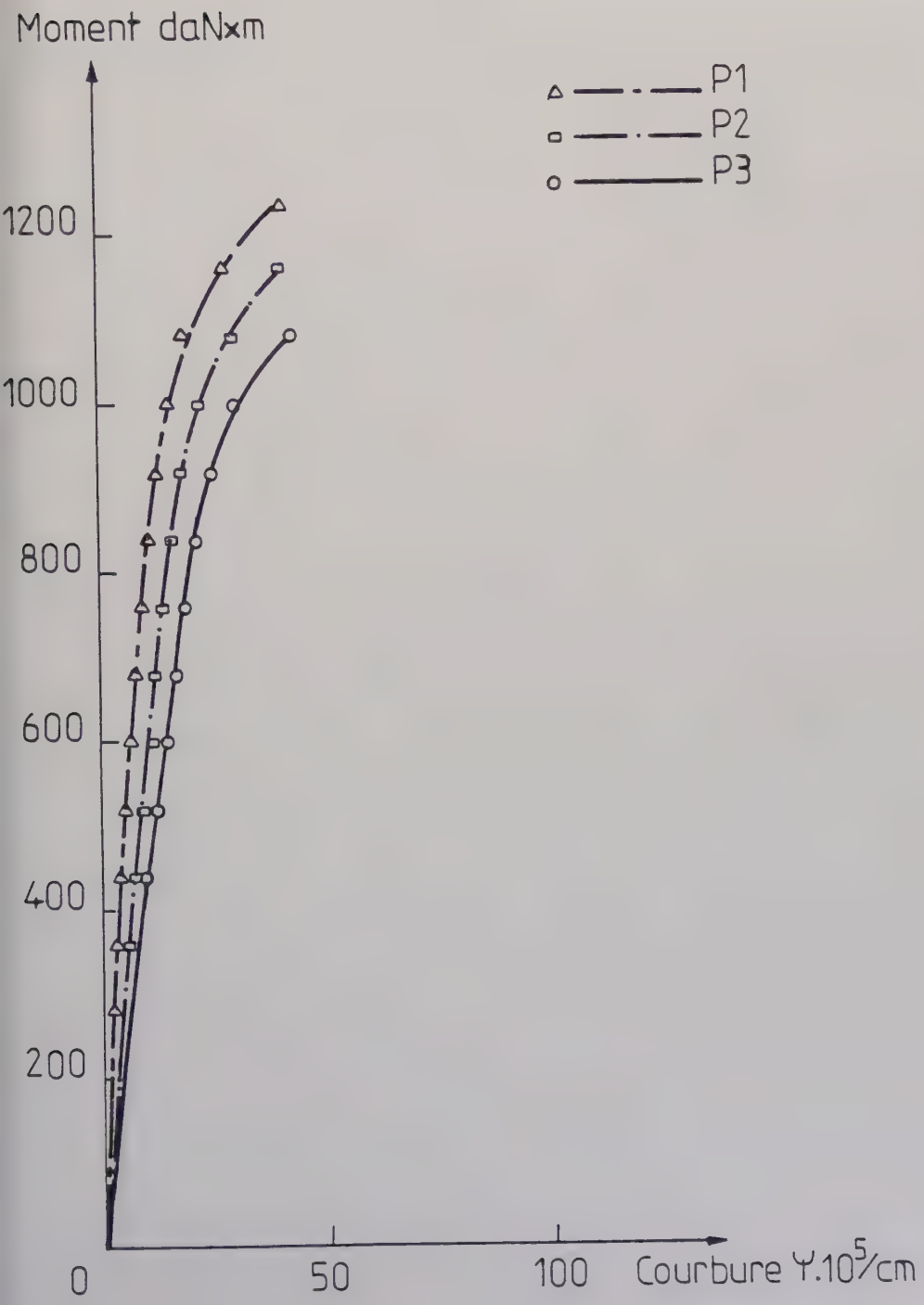
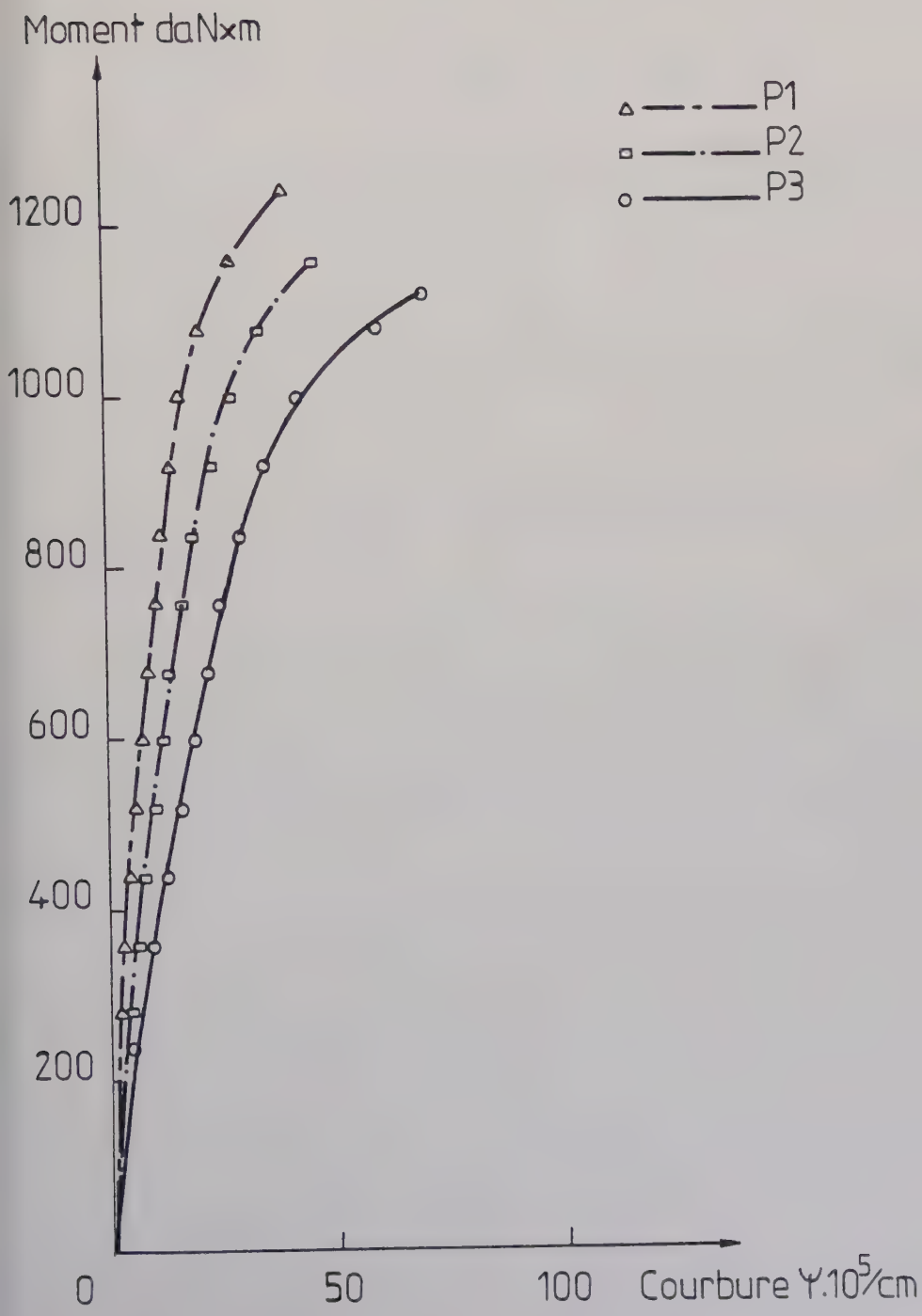


FIGURE III-6_POUTRES"B"_ESSAI 3_MOMENT-COURBURE



Toutefois on retrouve généralement le classement P1, P2, P3 par ordre de déformabilité croissante. Cependant la figure III.4 montre que ce classement n'est pas toujours respecté car P1 semble avoir une courbure plus grande que celles de P2 et P3.

Ce phénomène est dû surement à la propagation très aléatoire de la fissuration de l'écorce céramique de P1 qui peut fausser les réponses des capteurs de mesure qui y sont implantés.

Enfin, nous pouvons dans le cas de la loi moment-flèche tout au moins, faire la comparaison des zones de comportement décrites en II.1.1. (états "dit" élastique, fissuré et "dit" plastique).

III.1.1.1. Comportement des poutres dans la zone "dite" élastique (OA)

On remarque sur les figures III.1. à III.3 (lois moment-flèche) que dans la zone "dite" élastique les trois poutres P1, P2 et P3 se classent dans cet ordre par déformabilité croissante. On observe de plus que l'amplitude de la zone "dite" élastique décroît dans le sens P1, P2, P3, ce qui est compatible avec le fait que nous ayons noté au cours des essais que les fissures de P1, P2, et P3 apparaissent respectivement à des charges de 20, 14 et 9 KN en moyenne.

Ces observations confirment le phénomène observé dans le cas des poutres "A" (modèles réduits) à savoir que dans la zone élastique la déformabilité de la poutre est d'autant moins élevée que la participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication est importante.

III.1.1.2. Comportement des poutres dans la zone fissurée (BC)

Comme le montrent les figures III.1. à III.3. représentant les lois moment - flèche de P1, P2, P3, le classement précédent se retrouve également dans la zone fissurée, c'est-à-dire que la déformabilité de la pièce diminue à mesure que la participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication s'accroît. En outre la figure III.7 qui illustre la comparaison des moments de plastification respectifs de P1, P2 et P3 confirme cette constatation.

III.1.1.3. Comportement des poutres dans la zone "dite" plastique (DE)

Les mêmes figures III.1. à III.3. montrent que le classement P1, P2, P3 par ordre de déformabilité croissante est respectée également dans la zone plastique.Nous retrouvons de ce fait la même constatation faite pour les poutres "A" (modèles réduits).

A l'issue de ces différentes comparaisons, il apparaît que la présence de la céramique se caractérise par une augmentation de la rigidité flexionnable. En effet les pièces se déforment de moins en moins de P3 à P1, pour un même niveau de chargement.

III.1.2. Déformations de la face supérieure comprimée des noyaux béton

Les figures III.8 à III.10 illustrent la comparaison des déformations de la face supérieure de P1, P2 et P3 en fonction du moment appliqué, pour les différents essais.

On peut y remarquer que la configuration des courbes obtenues ne correspond pas à un schéma trilinéaire, fait que nous avons constaté pour les poutres "A" (modèles réduits) également. Cependant ces figures montrent que la déformation de raccourcissement de la face comprimée du "noyau béton" est d'autant plus élevée que la

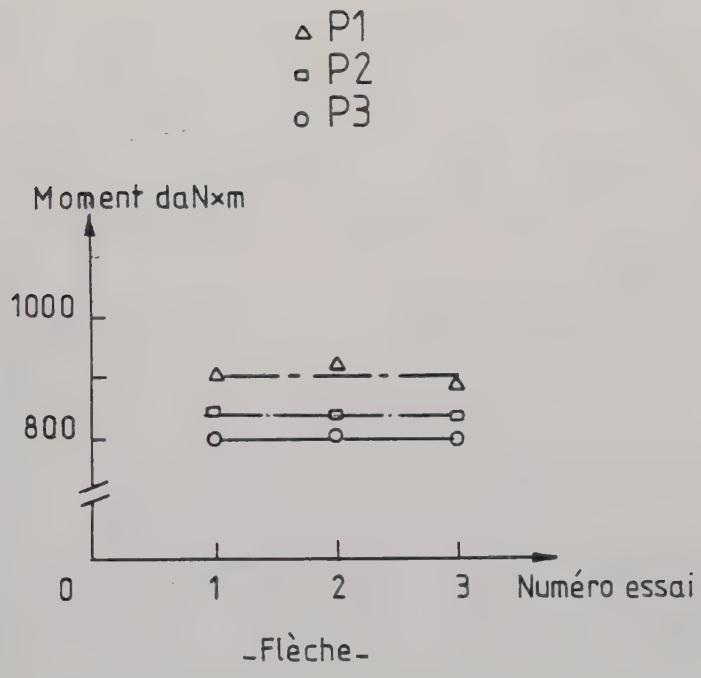


FIGURE III-7_POUTRES "B"_"MOMENTS DE PLASTIFICATION"

FIGURE III-8_POUTRES"B"_ESSAI 1

Déformation de la fibre supérieure de béton

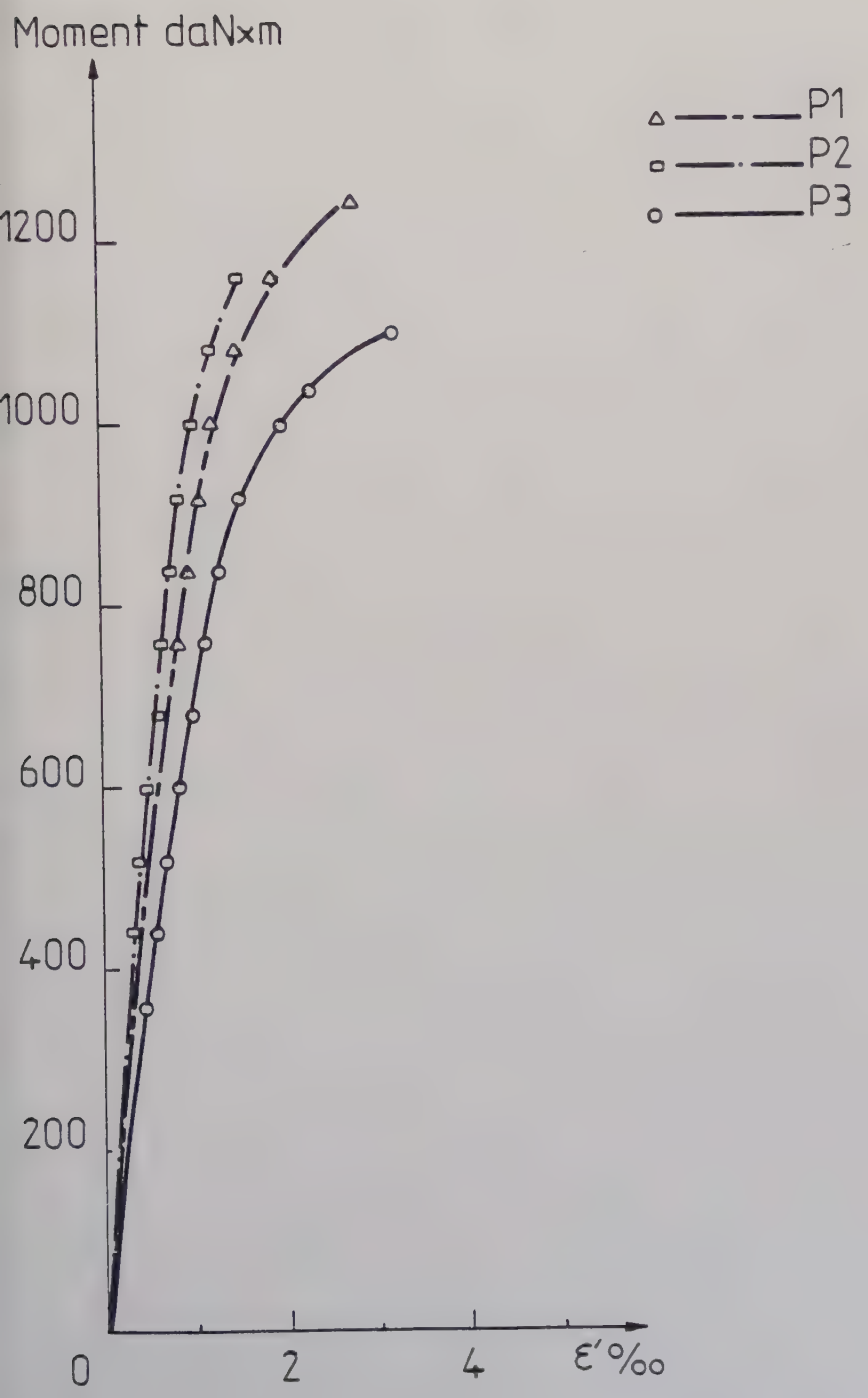


FIGURE III-9_POUTRES "B"_ESSAI 2

Déformation de la fibre supérieure de béton

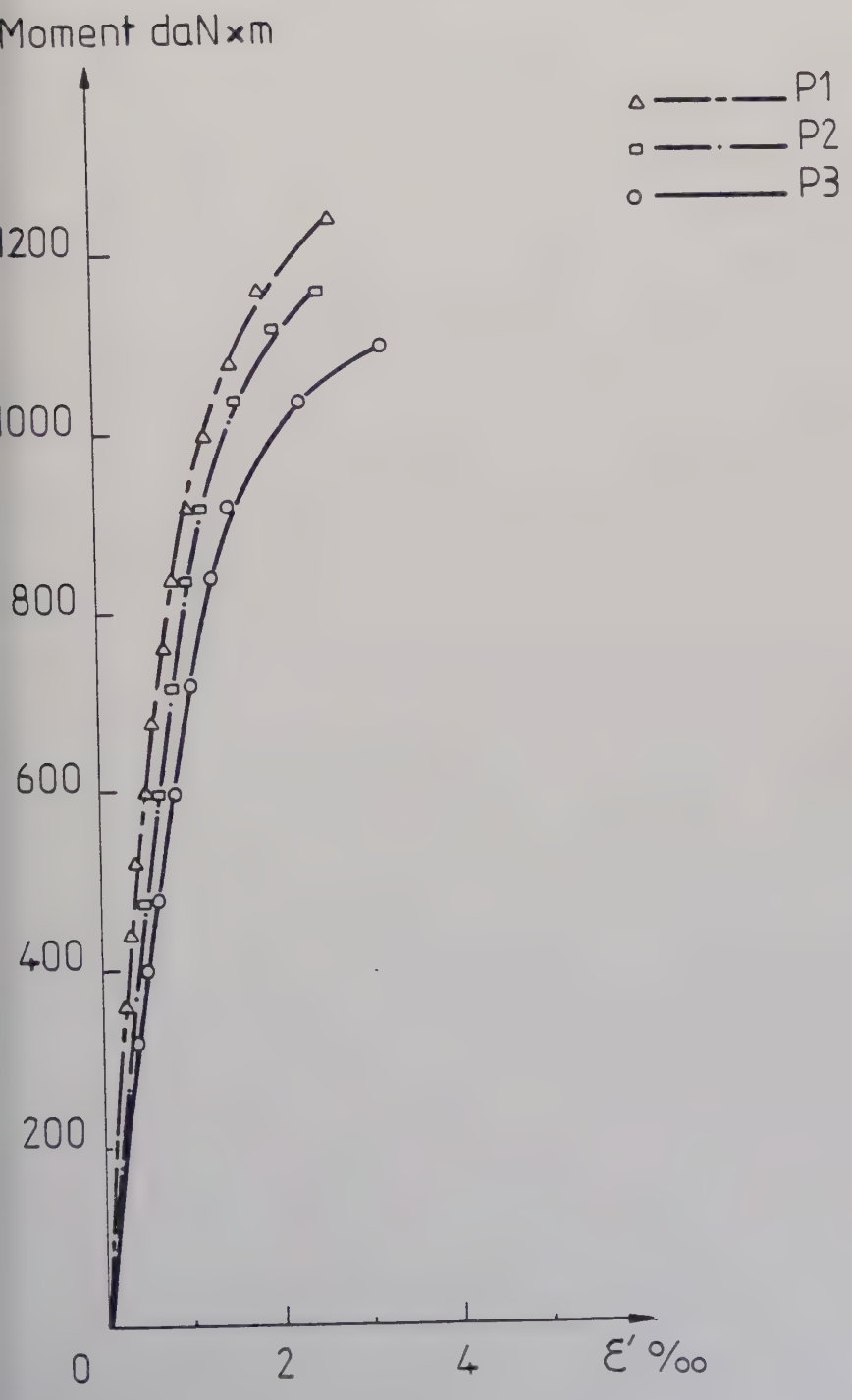
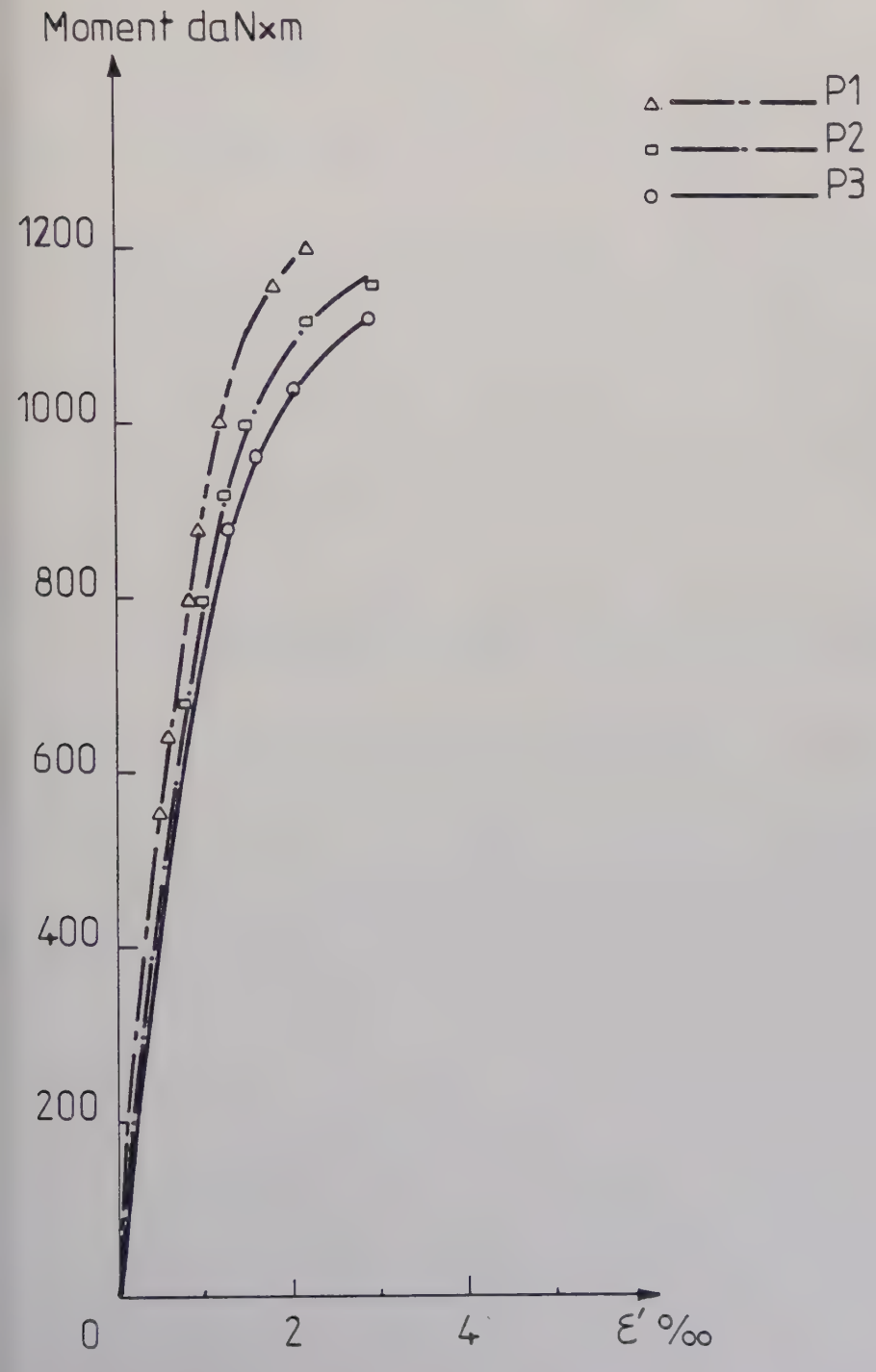


FIGURE III-10_POUTRES "B"_ESSAI 3

Déformation de la fibre supérieure de béton



participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication est importante. Toutefois ce phénomène n'est pas observé dans le cas de la figure III.8 où on peut voir que P1 semble se déformer plus que P2, cela s'explique par le caractère local des mesures effectuées car la déformation maximale peut bien se produire ailleurs qu'à l'endroit où est implantée la jauge.

Par ailleurs, on peut remarquer sur les figures III. 8 à III.10 que contrairement aux poutres "A" (modèles réduits) les trois corps d'épreuve P1, P2 et P3 se démarquent nettement au niveau des déformations de raccourcissement de la face comprimée dans le cas des poutres "B" (vraie grandeur). De plus on peut constater que la déformation de la face comprimée de la poutre diminue à mesure que s'accroît la participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication (classement P1,P2, P3 par ordre de déformabilité croissante).

III.2. COMPORTEMENT DES POUTRES AUX ETATS LIMITES D'UTILISATION

III.2.1. Moment de service expérimental

Pour les mêmes raisons que celles évoquées en II.2.1. nous prendrons comme moment caractérisant l'état de service expérimental, un moment égal au moment de fissuration expérimental relevé au cours des essais. Les résultats correspondant à P1, P2 et P3 pour l'ensemble des essais sont consignés dans le tableau III.1.

N° Essai	Moment de fissuration daN x m		
	P1	P2	P3
	⋆ = 0 □ = 400	⋆ = 18 □ = 293	⋆ = 8,6 □ = 193
1	400	280	200
2	400	320	180
3	400	280	200

Tableau III.1.

Le tableau III.1. montre que le moment de fissuration de la poutre décroît à mesure que la participation de la céramique dans sa constitution et (ou) sa fabrication diminue. Ainsi le rôle de la céramique se caractérise par un retardement de la fissuration du linteau dans le cas présent des poutres "B" à grande échelle. On peut alors penser qu'il y a là un effet d'échelle par rapport aux poutres "A" (modèles réduits) puisque P1, P2 et P3 se fissuraient comme nous l'avions fait remarquer, pratiquement à la même charge.

III.2.2. Comportement des poutres aux états limites d'utilisation

Les états limites que nous considérons sont les mêmes que ceux adoptés pour les poutres "A" (modèles réduits) à savoir:

- l'état limite de déformation (flèche) qui est le plus fréquemment vérifié en pratique et ;
- l'état limite de réversibilité.

⋆ =Ecart type

□ =Moyenne

III.2.2.1. Etat limite de déformation

Comme en II.2.2.1. cet état limite est caractérisé par la condition de limitation de la flèche maximale de la poutre :

$$f_{max} \leq \frac{l}{500}$$

Soit avec l = portée de la poutre = 200 cm

$$f_{max} \leq 0,4 \text{ cm}$$

Ensuite selon le même procédé décrit en II.2.2.1. (cf schéma) nous en déduisons les moments de service correspondant à P1, P2 et P3 pour l'ensemble des essais. Les valeurs ainsi obtenues sont consignées dans le tableau III.2

Numéro Essai	Moment de service (daN x m			GAINS %		
	P1	P2	P3	P1 - P2	P2 - P3	P1 - P3
				⋆=22,1 □=5,3	⋆=21,66 □=5,55	⋆=38,91 □=18,34
1	640	480	360	25	25	43,75
2	640	500	400	22	20	37,5
3	620	500	400	19,35	20	35,5

Tableau III.2.

⋆=Moyenne

□=Ecart type

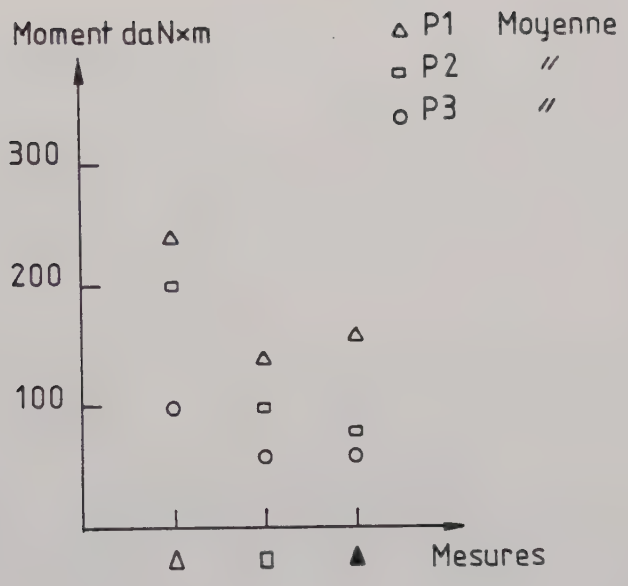
On remarque dans ce tableau que le moment de service décroît de P1 à P3 et reste toujours supérieur aux moments de services expérimentaux respectifs de P1,P2 et P3 consignés dans le tableau III.1.

Nous retrouvons alors dans le cas des poutres "B" (grande échelle) le même phénomène que dans celui des poutres "A" (modèles réduits) à savoir que la présence de la céramique se caractérise par une augmentation du moment de service à mesure que sa participation dans la constitution et (ou) la fabrication de la poutre s'accroît. Cette augmentation du moment de service relatif à l'état limite de déformation (flèche) peut se résumer dans les proportions suivantes sur la base des chiffres du tableau III.2 :

- P1 a un gain de 22 % par rapport à P2
- P2 a un gain de 21% par rapport à P3 et ;
- P1 a un gain de 37% par rapport à P3.

III.2.2.2. Etat limite de réversibilité

Pour mettre en évidence l'influence de la céramique sur la réversibilité des différentes poutres, nous avons représenté sur la figure III.11.les limites de réversibilité relatives à la flèche, au raccourcissement de la face comprimée du béton et à l'allongement de la fibre inférieure. On peut y remarquer le même phénomène que pour les poutres "A" (modèles réduits) à savoir que le moment limite de réversibilité (défini en II.2.2.2. comme le moment correspondant à la valeur au delà de laquelle le degré de réversibilité R est inférieur à 100 %) décroît de P1 à P3. Ainsi la présence de la céramique se traduit par une augmentation du "moment limite de réversibilité" à mesure que sa participation dans la constitution et (ou) la fabrication de la poutre s'accroît.



△ Flèche

□ Raccourcissement de la fibre supérieure de béton

▲ Allongement de la fibre inférieure

FIGURE III-11_POUTRES"B"_LIMITES DE REVERSIBILITE

III.3. COMPORTEMENT DES POUTRES A LA RUPTURE

III.3.1. Moments de rupture expérimentaux : Mr

La figure III.12 illustre la comparaison des moments de rupture expérimentaux de P1, P2 et P3 pour l'ensemble des essais effectués. On peut y remarquer le classement P1, P2, P3 par ordre de moment de rupture décroissant. Nous retrouvons en cela le même phénomène observé pour les poutres "A" (modèles réduits) à savoir que la résistance de la poutre s'accroît à mesure que la participation de la céramique dans sa constitution et(ou) sa fabrication augmente.

Sur la base de la figure III.12, nous pouvons affirmer que vis-à-vis de la rupture :

- P1 est renforcée de 5 % par rapport à P2 ;
- P2 est renforcée de 5 % par rapport à P3 et;
- P1 est renforcée de 10 % par rapport à P3.

III.3.2. Calcul du moment de rupture de la poutre composite P1

Comme pour les poutres "A" (modèles réduits) nous calculons la valeur théorique du moment de rupture de la poutre composite P1, par la formule proposée par la B.C.R.A. * (4). Ensuite nous comparons le résultat de ce calcul à la valeur expérimentale du moment de rupture de ladite poutre afin de cerner les limites de validité de la formule utilisée.

---

* B.C.R.A. : The British Ceramic Research Association

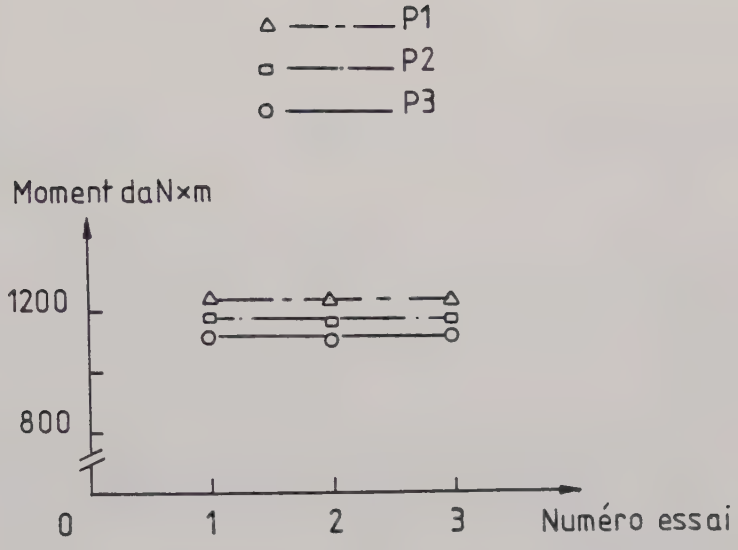


FIGURE III-12_POUTRES "B"_MOMENTS DE RUPTURE

Nous avons vu en II.3.2. que le moment de rupture Mr se détermine par la relation

$$M_r = 0,3\ b.d^2\ .\ 1,5\ f'_k \qquad (1)$$

avec b = largeur du "noyau béton" + épaisseur nette de l'écorce céramique"

b = 19 cm

d = hauteur utile = 12, 5 cm

f'_k = résistance caractéristique en compression de la section mixte, sa valeur est définie en I.3.4.2. et vaut ici

f'_k = 180 daN/cm2

En remplaçant les symboles par leur valeur dans la relation (1) on obtient :

M_r = 2405 daN x m

Cette valeur est supérieure au moment de rupture expérimental qui est de 1240 daN x m. Comme en II.3.2. pour les poutres "A" (modèles réduits), cela pourrait provenir essentiellement d'une mauvaise appréciation du coefficient de majoration de la résistance en compression par flexion par rapport à celle en compression simple (1,5 dans la relation (1)).

Si au lieu de 1,5 nous prenons 1,25 comme nous l'avions proposé dans le cas des poutres "A" (modèles réduits) au chapitre précédent, on obtient un écart plus réduit, de 38 % entre la valeur expérimentale et la valeur théorique qui est alors de 2004 daN x m. Selon donc toute vraisemblance nous pouvons affirmer que comme pour les poutres "A" (modèles réduits), une bonne appréciation du coefficient en question devrait réduire l'écart entre les moments de rupture expérimental et théorique dans une proportion acceptable.

III.4. CONCLUSIONS

1/ Les résultats de ces essais ont montré que les phénomènes observés pour les poutres "A" (modèles réduits) se retrouvent pour les poutres "B" (vraie grandeur). En d'autres termes la résistance du linteau (ou de la poutre) augmente à mesure que la participation de la céramique dans sa constitution et-(ou) sa fabrication s'accroît, ceci aussi bien à l'état limite d'utilisation qu'à la rupture.

Les accroissements relatifs de performance à l'état limite d'utilisation (flèche) et à la rupture, relevés pour les poutres "B" (vraie grandeur) ainsi que ceux correspondants aux poutres "A" (modèles réduits), sont consignés dans les tableauxIII.3 et III.4 respectivement.

	Accroissement de performance (M serv) %	
	Poutres "A"	Poutres "B"
P1-P2	17	22
P2-P3	16	21
P1-P3	30	43

Tableau III.3

	Accroissement de performance (M rupt) %	
	Poutres "A"	Poutres "B"
P1 - P2	9	5
P2 - P3	12	5
P1 - P3	21	10

Tableau III.4

Comme le montre le tableau III.3 les accroissements du moment de service sont dans le même ordre de grandeur pour les poutres "A" (modèles réduits) et pour les poutres "B" (vraie grandeur).

Par contre les gains sur le moment de rupture sont pratiquement réduits de moitié pour les poutres "B" (vraie grandeur) par rapport aux poutres "A" (modèles réduits). Nous pensons que cela s'explique essentiellement par la différence de configuration de l'écorce céramique", épaisseur pleine pour les poutres "A" et alvéolaire pour les poutres "B" (cf. figure I.26 et I.28). Il en résulte que mécaniquement les claustras sont plus performants que les briques pour linteaux d'autant plus que ces dernières présentent des fissures initiales. Les chiffres du tableau I.11 peuvent confirmer cet argument. Par ailleurs les tableaux III.3 et III.4 montrent que les gains sont inversés entre les poutres "A" et les poutres "B". En l'occurence les gains en service pour les poutres "A" sont inférieurs à ceux observés pour les poutres "B" tandis que c'est le phénomène contraire pour les gains à la rupture. Si nous comparons les rapports $\frac{Sc}{Sb}$

avec Sc = section céramique et Sb = section du noyau béton, pour les deux séries de poutres "A" et "B" nous obtenons la relation ci-dessous

$$\left(\frac{S_c}{S_b}\right)_{"A"} = 0,6 < \left(\frac{S_c}{S_b}\right)_{"B"} = 0,8$$

On peut alors affirmer raisonnablement que la succion est plus importante dans le cas des poutres "B" que dans celui des poutres "A", cela expliquerait que les gains en service soient plus élevés pour les poutres "A" que pour les poutres "B" puisque selon toute vraisemblance c'est le "noyau béton" qui conditionne le comportement de la poutre P1A avant son entrée dans la zone "dite" plastique (cf. figure § II.1). Cet argument est confirmé par le fait que, au cours des essais nous ayons constaté que les fissures de la zone tendue se produisaient toujours dans la jointure des claustras qui est une zone de moindre résistance où c'est en fait le noyau béton qui est directement tendu, tandis que la fissuration en compression des claustras n'apparaissait qu'à une charge aux alentours du moment de plastification.

C'est à partir de ce moment de plastification, précédant la rupture que la résistance de l'écorce céramique (en compression et en traction) devient déterminante. Etant donné qu'il y a des fissures initiales dans les briques pour linteaux on peut alors penser qu'elles sont moins performantes mécaniquement que les claustras qui ne présentent pas de fissuration initiale. De plus, le fait que contrairement aux poutres P1A, nous ayons observé des fissures de traction dans les briques pour linteaux des poutres P1B à une charge bien en deçà du moment de plastification montre que mécaniquement elles interviennent plus rapidement que les claustras et perdent ainsi une part importante de leur efficacité vers la rupture, par rapport à ces derniers. Tout ceci explique que les gains à la rupture soient plus faibles pour les poutres "B" que pour les poutres "A".

Enfin la relation ci-dessous permet de comprendre que les briques pour linteaux puissent intervenir mécaniquement plus vite que les claustras.

$$\frac{l_{claustras}}{l\ P1_A} = 0,12 \quad < \quad \frac{l_{brique}}{l\ P1_B} = 0,2$$

l= longueur

2/ La formule proposée par la B.C.R.A. * permet de prédire le moment de rupture de la poutre composite P1 à la condition comme pour les poutres "A" (modèles réduits) de pouvoir préciser la valeur convenable du coefficient de majoration de la résistance en compression par flexion par rapport à celle en compression simple (facteur 1,5 dans la relation (1) du paragraphe III.3.2.). Ce coefficient peut être déterminé efficacement en effectuant des essais appropriés sur des éprouvettes mixtes céramique - béton, aussi bien en compression simple qu'en flexion simple.

* B.C.R.A. : The British Ceramic Research Association.

CHAPITRE IV

EFFET EN PRESENCE - INTERPRETATION

CHAPITRE IV

EFFET EN PRESENCE - INTERPRETATION

Dans les chapitres précédents, nous avons mis en évidence le rôle de la céramique sur le comportement en flexion pure des linteaux composites aussi bien dans le cas des poutres "A" (modèles réduits) que dans celui des poutres "B" (vraie grandeur).

Il importe maintenant de comprendre la nature de ce rôle, car selon toute vraisemblance il apparaît qu'il a plusieurs composantes. Nous nous proposons dans ce chapitre IV de répondre à cette question en analysant les différents effets en présence dans l'association de la céramique et du béton.

Le premier paragraphe est consacré à l'interprétation et à la description du mécanisme de fonctionnement de l'effet mécanique.

Le second et dernier paragraphe traite de l'interprétation et de la description du mécanisme de fonctionnement de l'effet physico-chimique.

IV.1. EFFET MECANIQUE

Dans les deux chapitres précédents nous avons pu observer des différences de comportement entre P1 et P2 que ce soit dans le cas des poutres "A" ou dans celui des poutres "B".

Ces différences ne peuvent être que d'origine mécanique puisque entre ces deux poutres la seule différence est la présence de l'"écorce céramique" de P1, à la sollicitation de flexion pure. Cet effet mécanique peut se manifester sur P1 de deux manières qui sont :

- la rigidification de P1 par l'augmentation de l'inertie de sa section donc de sa rigidité flexionnelle EI par rapport à P2. Les lois moment - flèche et moment-courbure représentées dans les chapitres II et III confirment bien cela, en effet on peut y observer que P2 a une plus grande déformabilité que P1 ;

- le frettage du "noyau béton" de P1 par l'écorce céramique" : en effet on peut penser qu'à cette rigidification s'ajoute un deuxième phénomène qui est le frettage du "noyau béton" par l'écorce céramique. Ceci pourrait avoir pour effet d'augmenter la résistance de la poutre composite, comme des études du phénomène de frettage des nervures de planchers B.A par Lorrain, Arnaud et Durmus ont d'ailleurs montré son effet favorable sur la sécurité (12).

Pour notre part, afin de mettre en evidence ce frettage nous avons mesuré l'extension transversale de la face supérieure comprimée du béton de P1, P2 et P3 à chaque essai. Les figures IV.1 et IV.2 illustrent la comparaison des mesures effectuées dans le cas des poutres "A" et "B" respectivement (modèles réduits et vraie grandeur).

A l'observation de la figure IV.1., il semble que pour les poutres "A", l'effet du frettage du "noyau béton" est négligeable car comme on peut le voir, les points correspondants à P1, P2 et P2 se confondent pratiquement. Par contre sur la figure IV.2. les points se démarquent assez nettement et on peut remarquer une plus grande déformation de P3 par rapport à(P1, P2) et dans une moindre mesure une plus grande déformation de P2 par rapport à P1. On peut donc en conclure que les différences sont dues essentiellement à l'effet physico-chimique, le frettage du "noyau béton" par l'"écorce céramique" apparaissant très atténué.

FIGURE IV-1_POUTRES "A"

Extension transversale de la face supérieure de béton

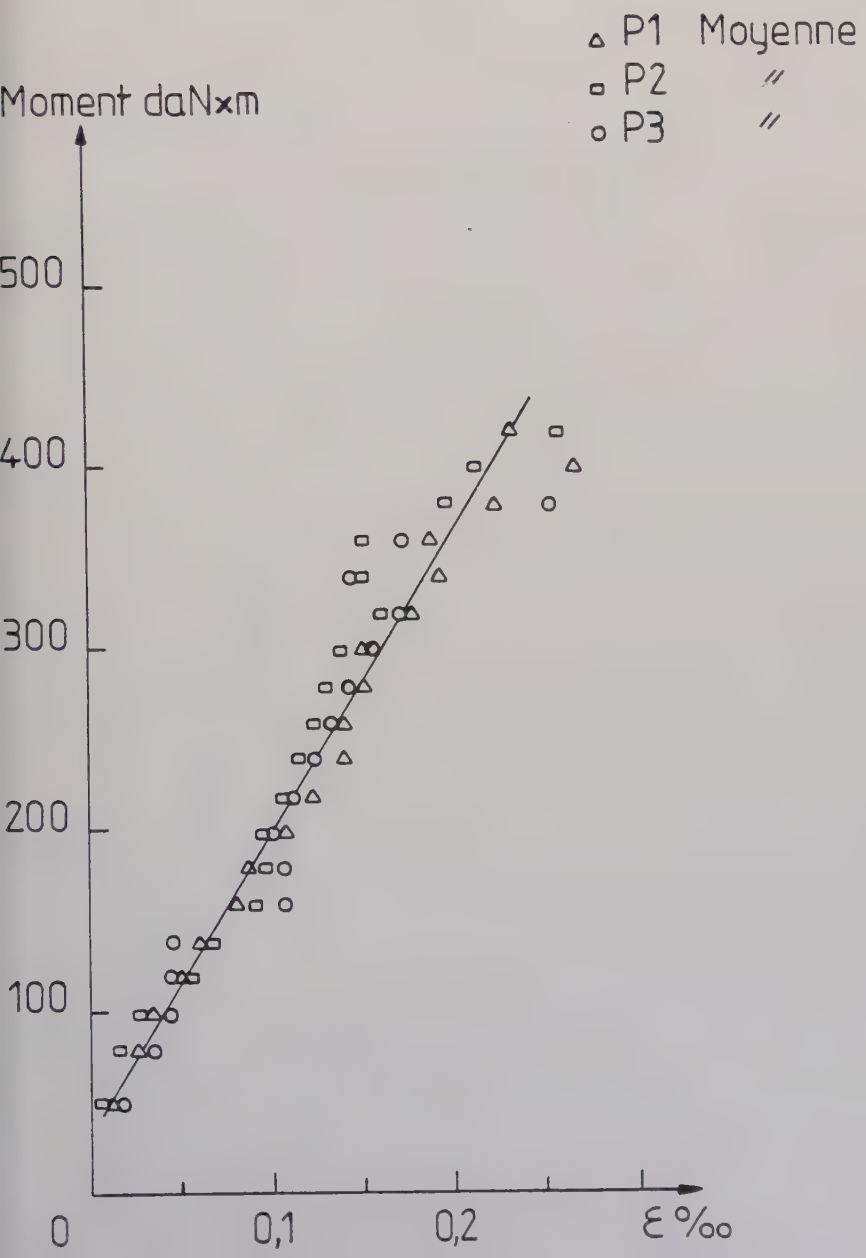
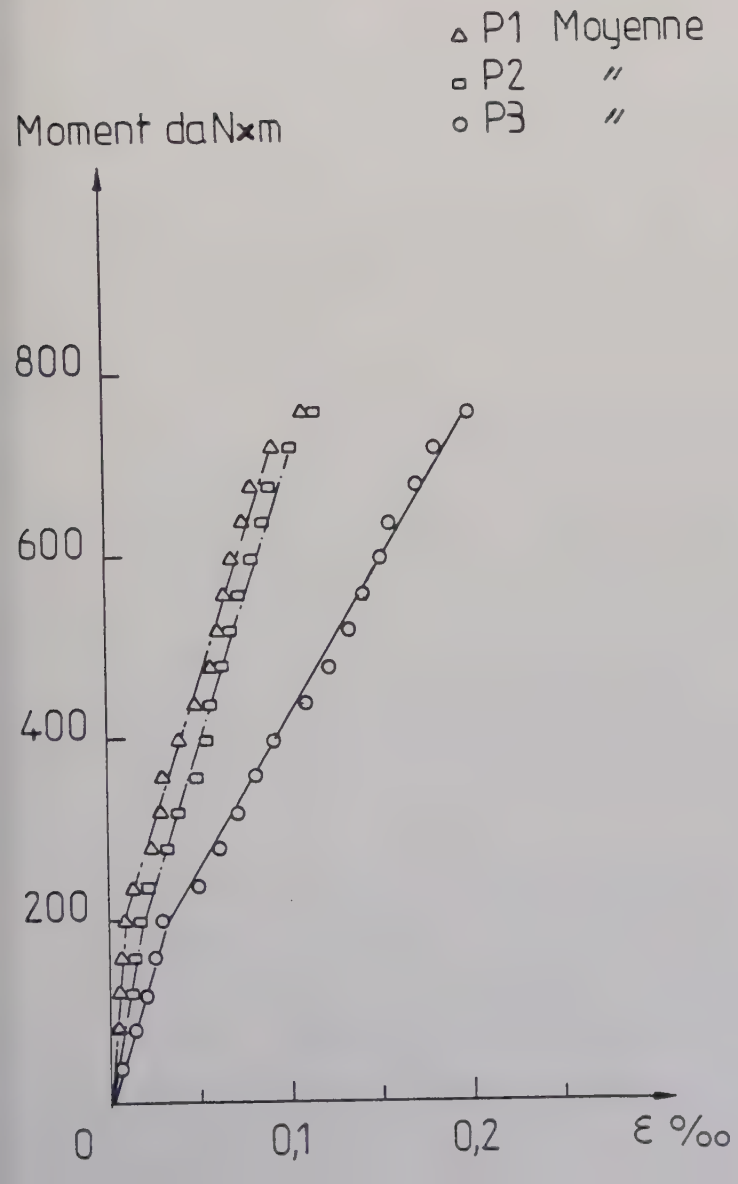


FIGURE IV-2_ POUTRES "B"

Extension transversale de la face supérieure de béton



IV.2. EFFET PHYSICO-CHIMIQUE

Dans les deux chapitres précédents nous avons également constaté des différences de comportement entre P2 et P3. Ces deux poutres ne se distinguent, nous le rappelons, que par le fait que la première est coulée dans un coffrage céramique qui absorbe par succion capillaire l'eau de gâchage ; et la seconde dans un coffrage excluant cette absorption au cours de la prise du béton. Ainsi les différences de comportement de ces deux poutres ne peuvent donc être que d'origine physico-chimique. Afin de mettre en évidence ce rôle physico-chimique joué par la céramique, nous avons effectué quelques essais, où contrairement aux poutres "A" précédentes, nous avons immergé les claustras pendant 48 heures (délai de saturation selon divers expérimentateurs (2) de manière à minimiser au maximum la succion capillaire voire la supprimer. Ainsi aux phénomènes de diffusion près, P2 et P3, seraient théoriquement coulées dans des conditions identiques.

Les figures IV.3. à IV.6. représentent les lois moment flèche comparées de P1, P2, et P3 pour l'ensemble des essais effectués tandis que dans les figures IV-7 à IV-10 nous en comparons les lois moment-courbure. Sur toutes ces figures, on peut remarquer la superposition des courbes correspondant à P2 et P3. Ceci montre bien que la succion capillaire de la céramique est à l'origine de l'amélioration des caractéristiques mécaniques de P2 par rapport à celles de P3. Cette conclusion est également confirmée par la figure IV.11 où on peut remarquer que les moments de rupture expérimentaux de P2 et de P3 sont pratiquement les mêmes.

Le mécanisme de ce rôle physico-chimique s'explique par le fait que, au coulage les pores de la céramique, plus petits que ceux du béton absorbent une partie de l'eau de gâchage ; tandis que l'hydratation commence et se poursuit, il arrive un moment où les pores du béton deviennent plus petits, le sens de l'absorption s'inverse alors et le béton reprend de l'eau à la céramique. Ce processus en réalité un peu plus complexe a été bien déve

FIGURE IV-3: CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 1

FLECHE-CHARGE

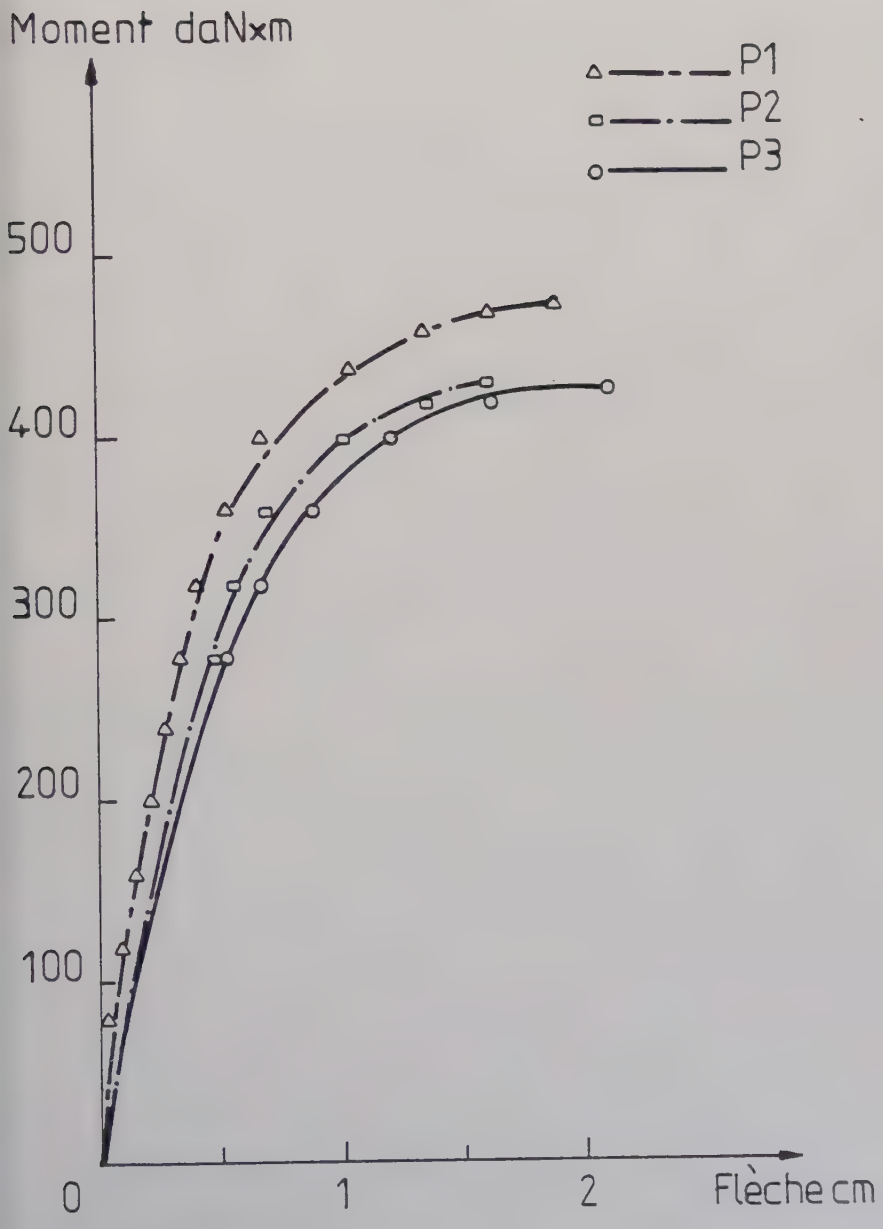


FIGURE IV-4:CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 2

FLECHE-CHARGE

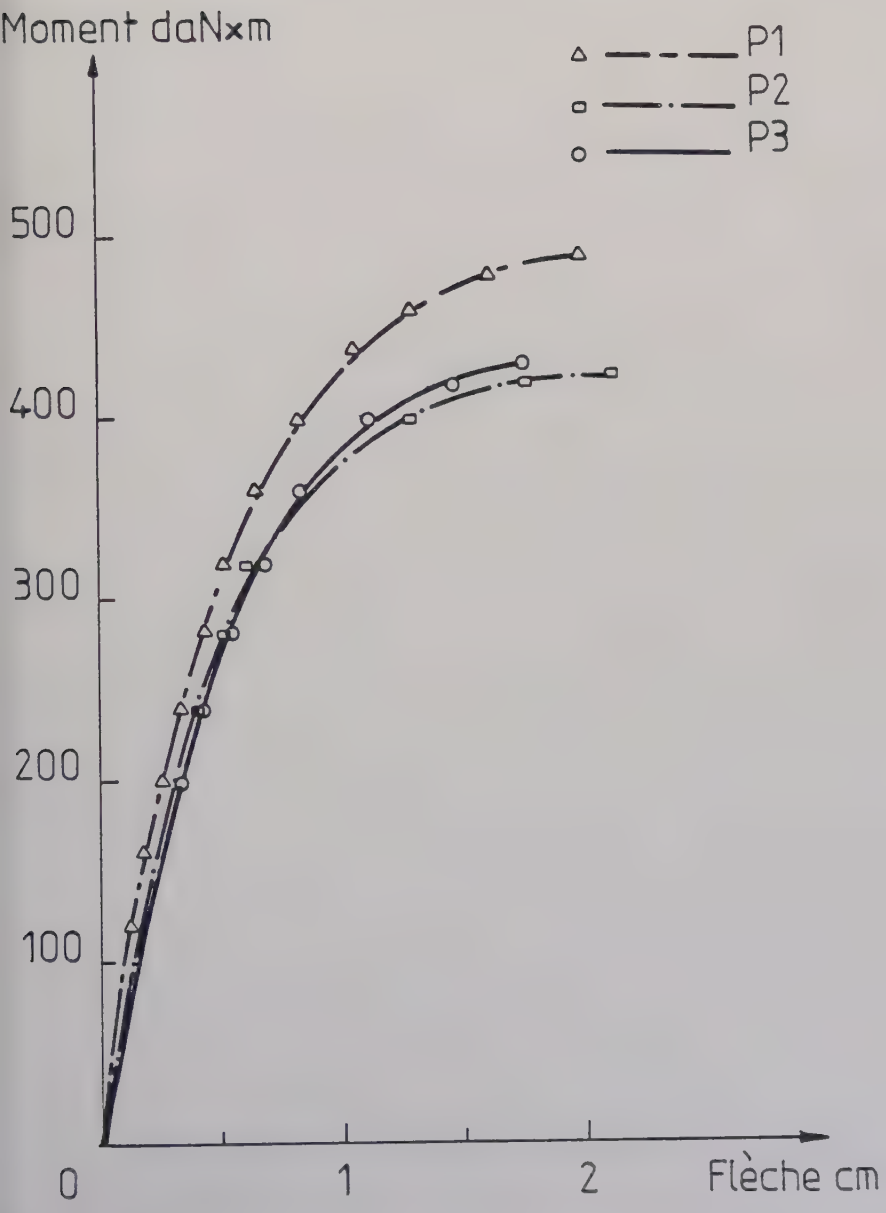


FIGURE IV-5 CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 3

FLECHE-CHARGE

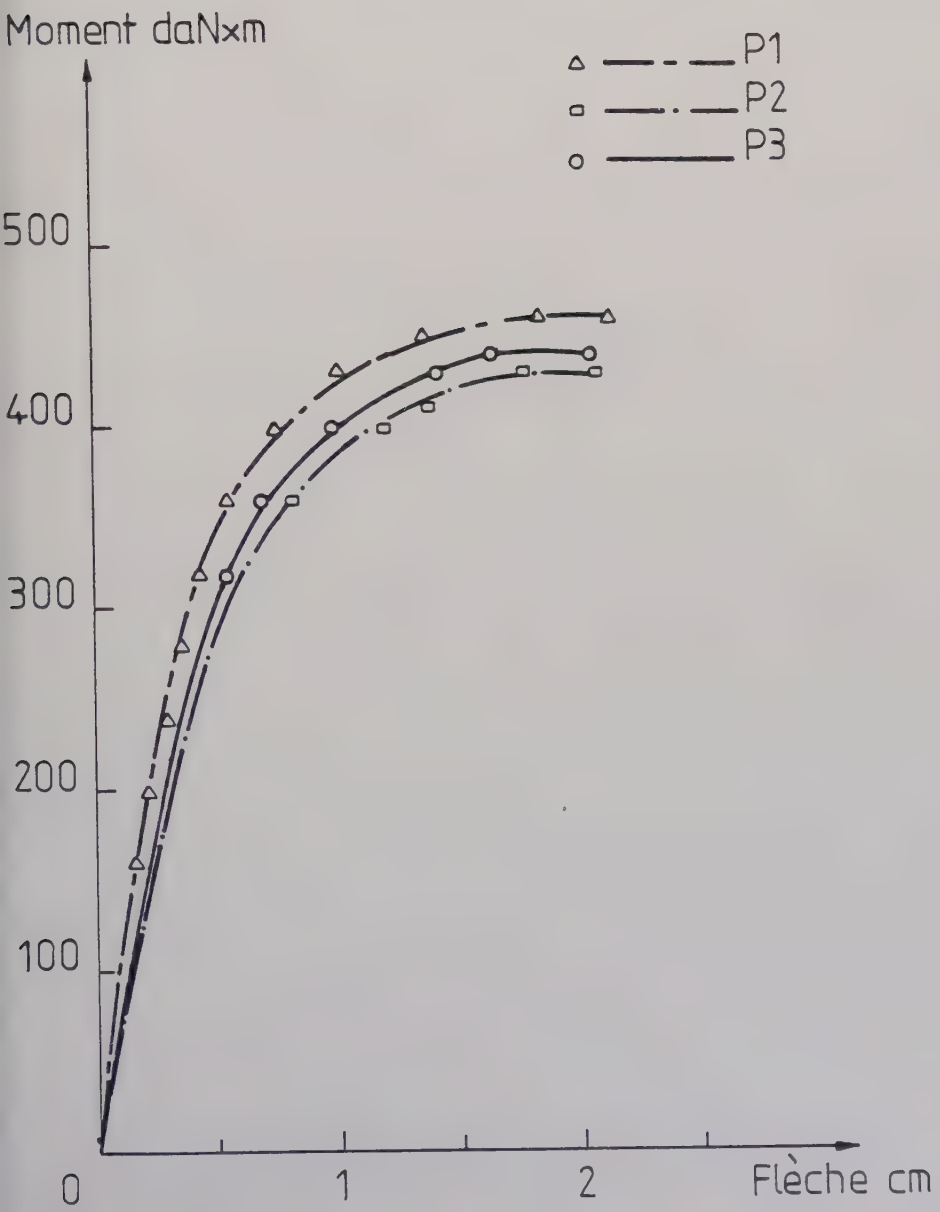


FIGURE IV-6: CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 4

FLECHE-CHARGE

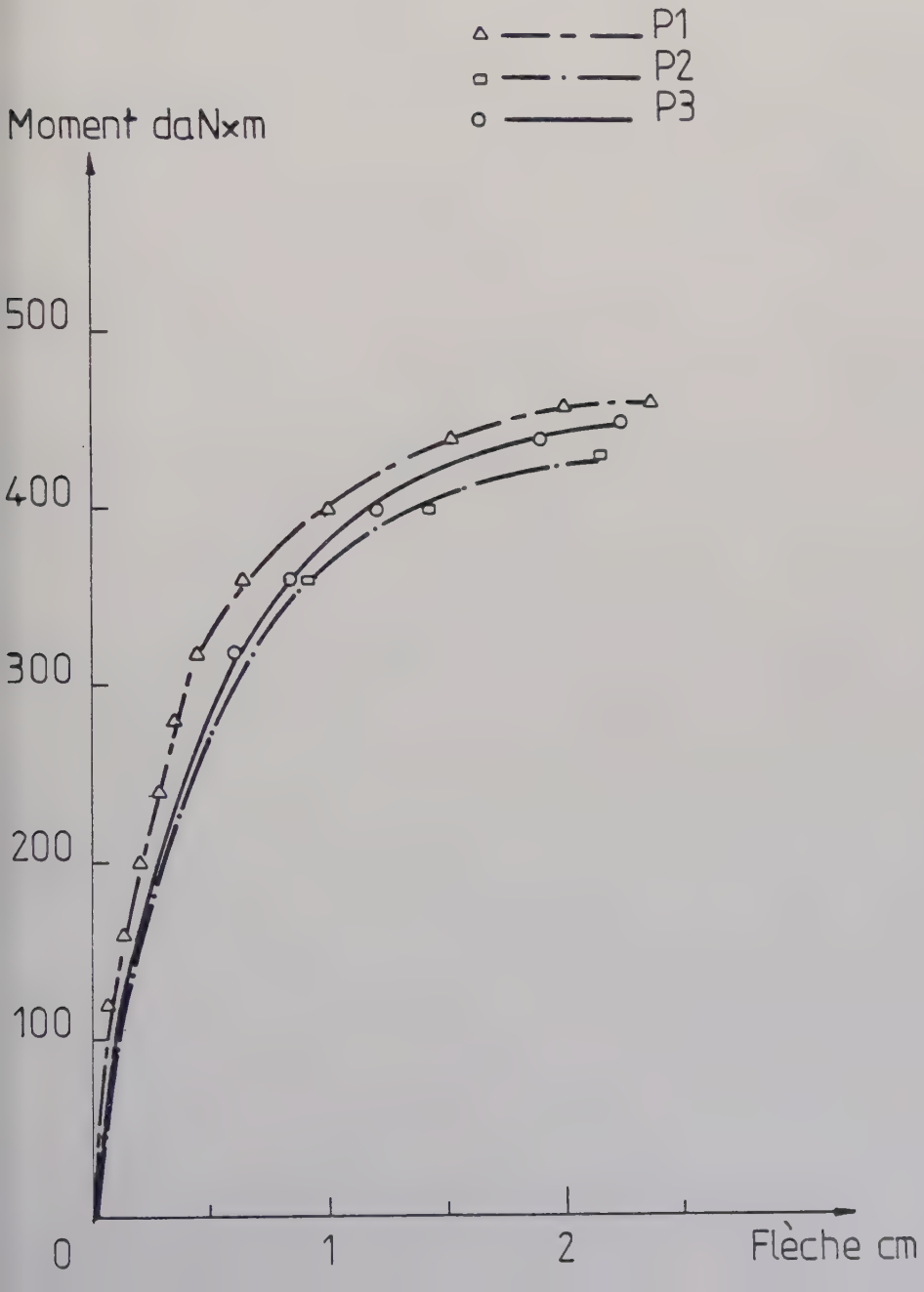


FIGURE IV-7 : CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 1

MOMENT-COURBURE

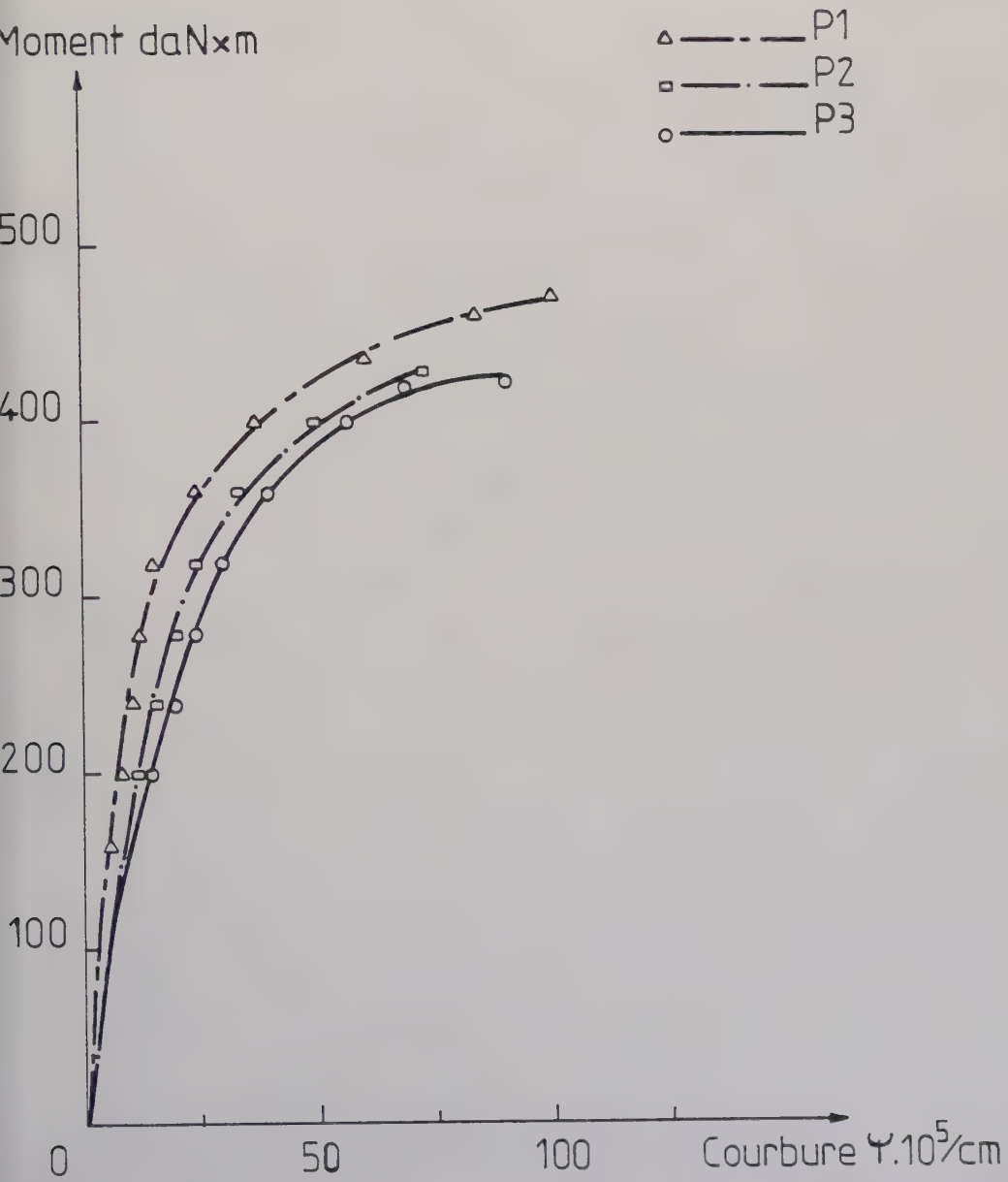


FIGURE IV-8: CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 2

MOMENT-COURBURE

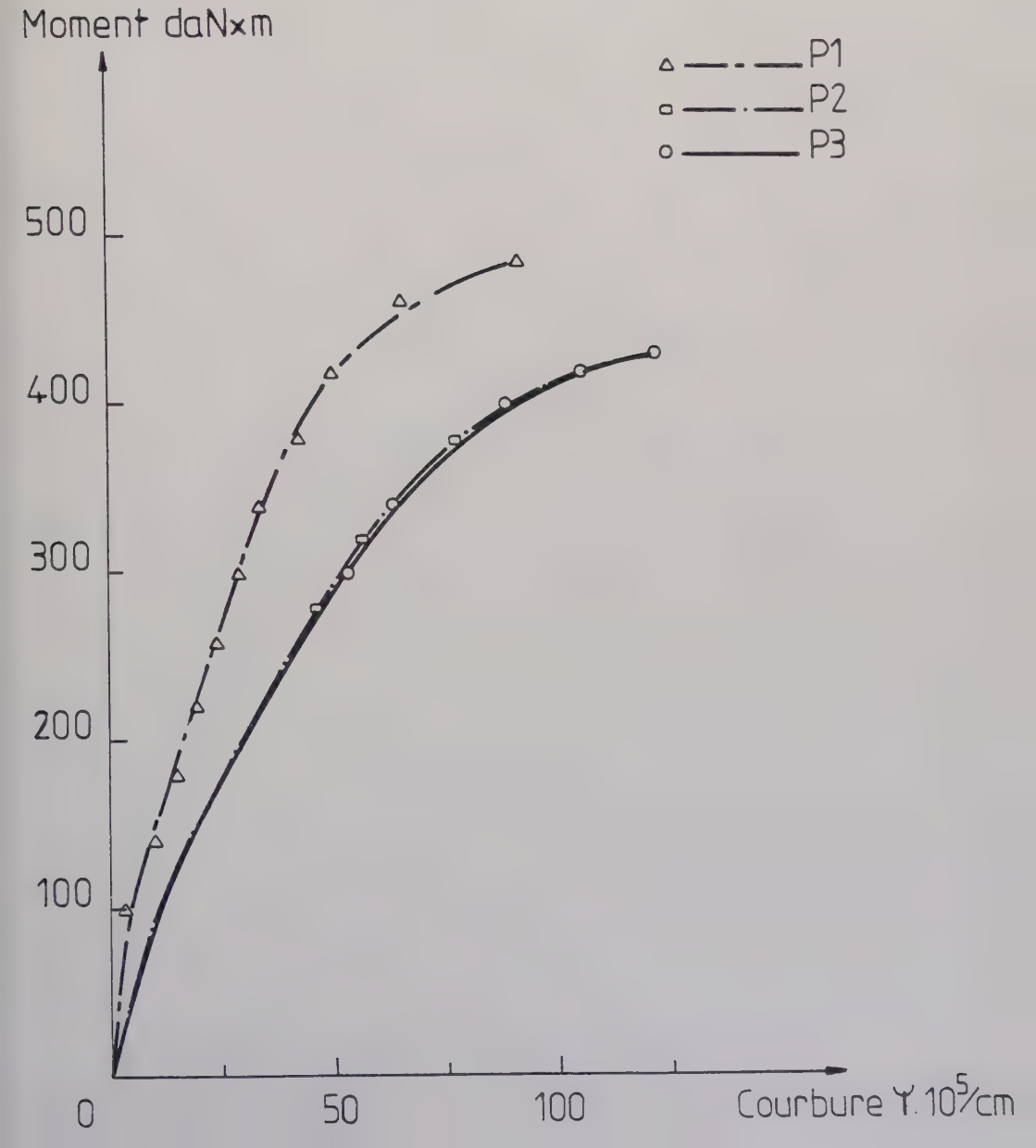


FIGURE IV-9: CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 3

MOMENT-COURBURE

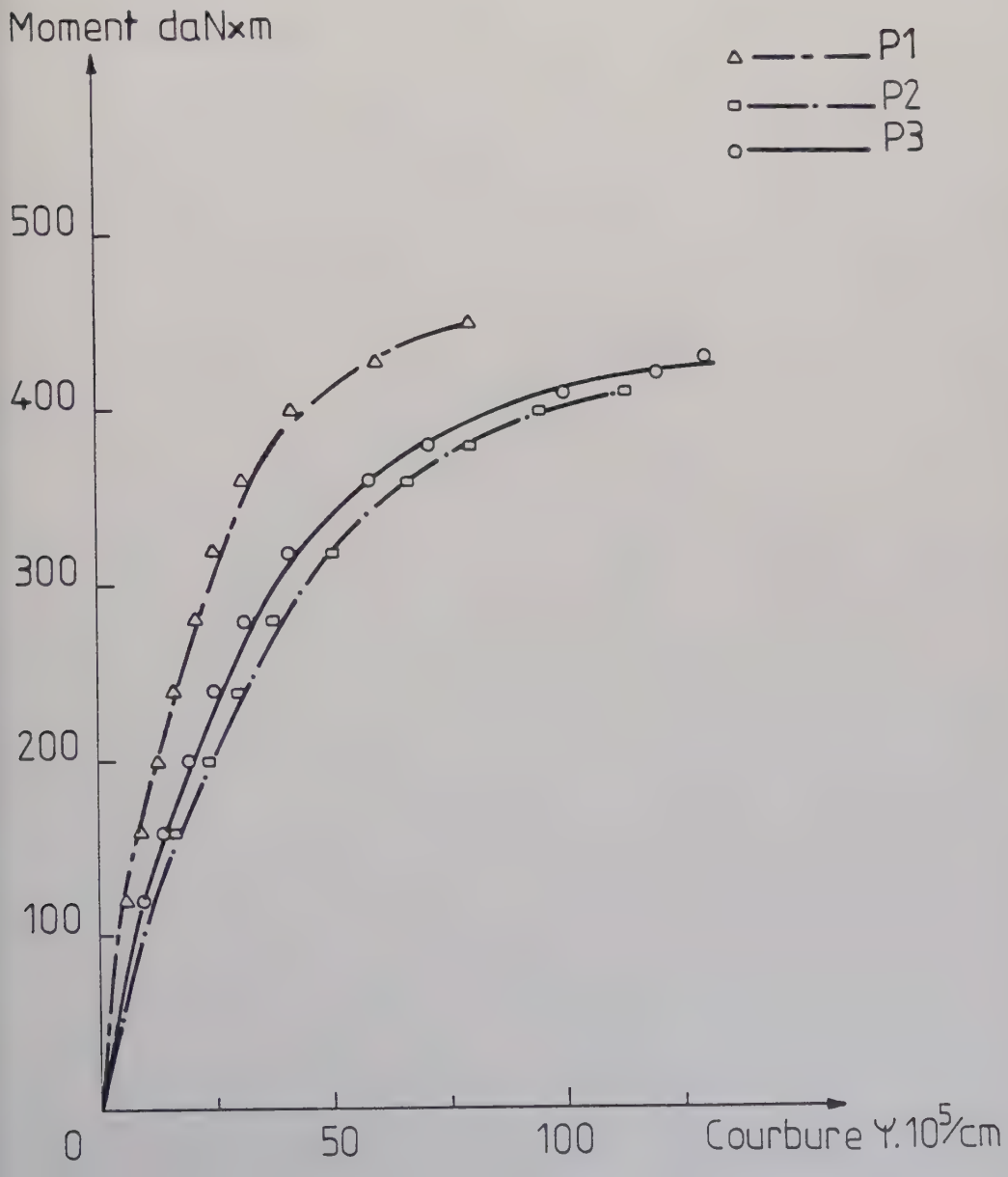
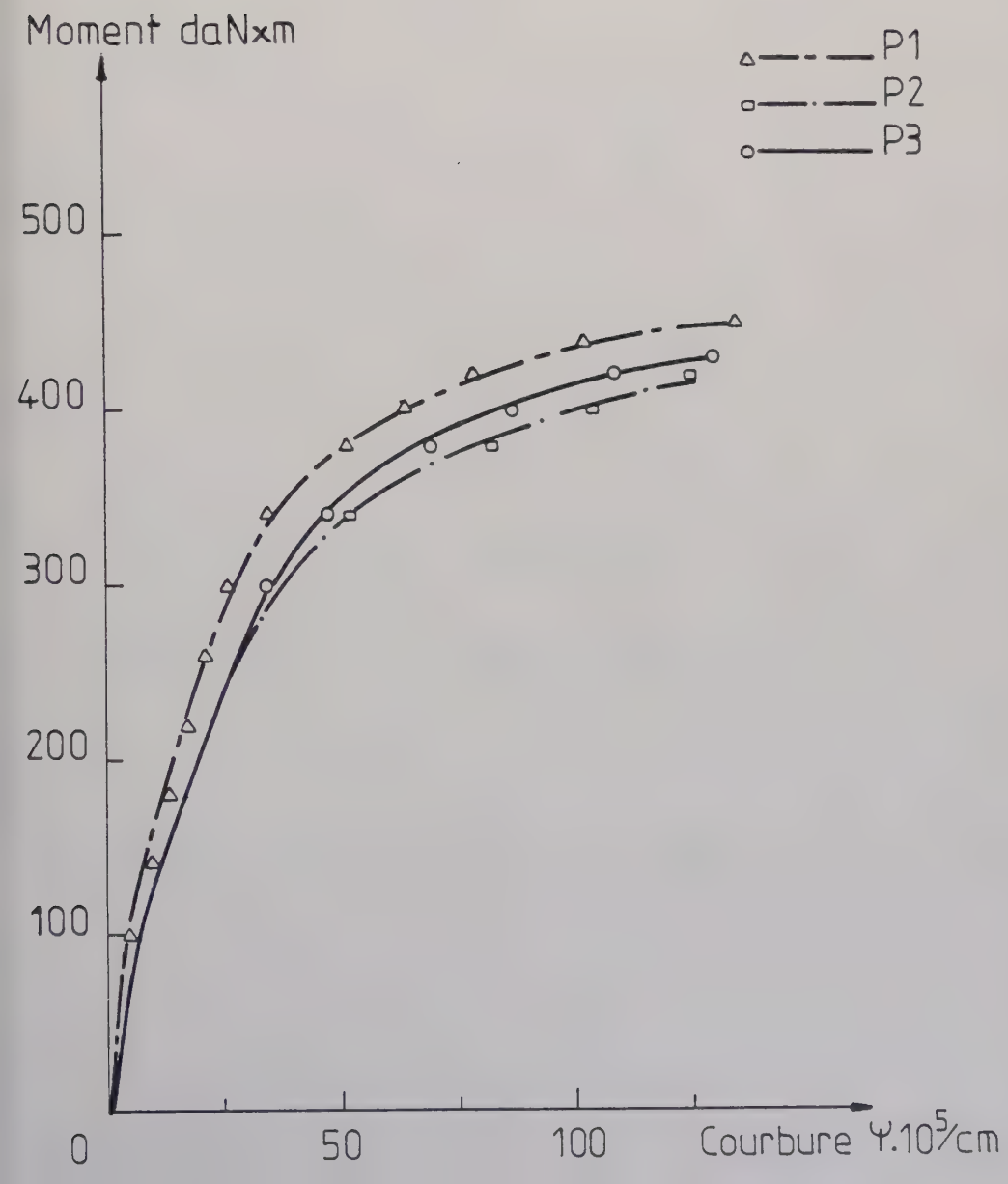


FIGURE IV-10: CERAMIQUE SATUREE_ESSAI 4

MOMENT-COURBURE



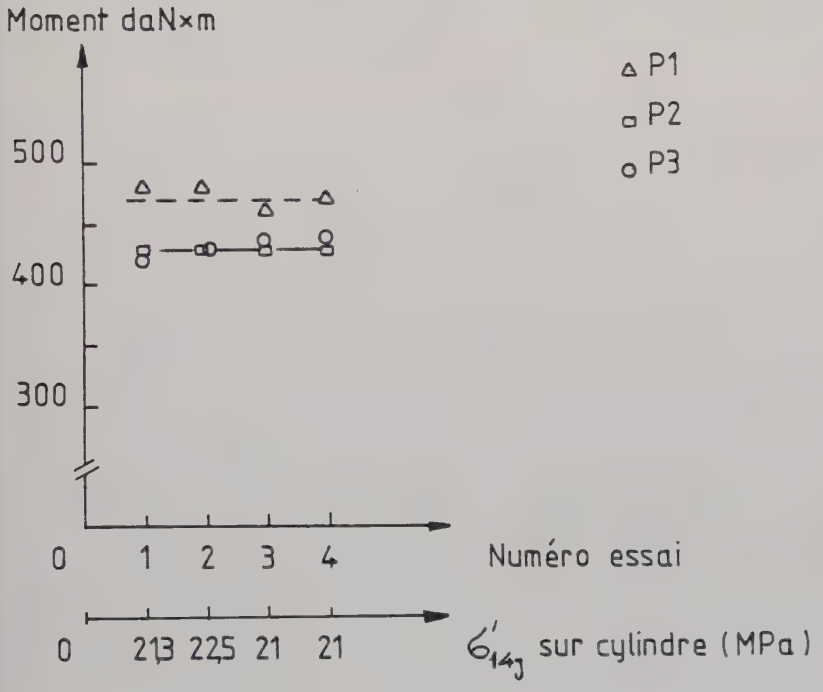


FIGURE IV-11:CERAMIQUE SATUREE_MOMENTS DE RUPTURE

loppé par GALLIAS (13).

Le phénomène d'échange d'eau ainsi décrit a pour conséquence que le béton a dans son sein une quantité d'eau "régulée" au cours de son hydratation (5). Cela se traduit probablement par une diminution du volume des vides du béton d'où résulte une meilleure résistance comme peuvent le laisser penser les résultats de nombreux chercheurs (28, (29), (30).

On peut donc dire, en accord d'ailleurs avec les résultats de Grandet (5), que la céramique joue un rôle de "régulateur" d'eau de gâchage au cours del'hydratation du béton. En effet si l'on regarde la figure IV.12 représentant la résistance du béton en fonction du rapport E/C on s'aperçoit que sa valeur optimale est obtenue pour un rapport critique Eo/C et qu'alors l'insuffisance d'eau de gâchage est plus nuisible que la surabondance (8). Pour cette dernière raison et pour une mise en place correcte du béton dans le coffrage on met toujours plus d'eau que la quantité nécessaire à son hydratation. Tout se passerait donc comme si la céramique, par l'entremise de la succsion capillaire, régulait la quantité d'eau au cours de l'hydratation, en ramenant E/C vers le rapport critique Eo/C

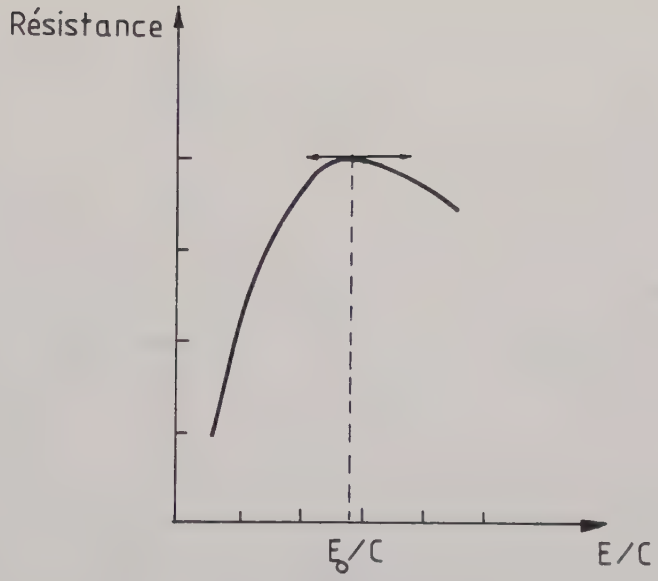


FIGURE IV-12

IV.3. CONCLUSIONS

Ces analyses permettent d'affirmer que le rôle de la céramique est double :

- un rôle mécanique mis en évidence par les écarts entre P1 et P2,
- un rôle physico-chimique mis en évidence par les écarts entre P2 et P3.

Ainsi comme nous le montrons dans les tableaux IV.1. et IV.2, les gains de performance observés peuvent être attribués à :

- l'effet mécanique (écarts entre P1 et P2)
- l'effet physico-chimique (écarts entre P2 et P3),
- la somme de ces deux effets pour le gain total (écarts entre P1 et P3).

Accroissement de Mserv %		
	Poutres "A" (modèles réduits	Poutres "B" (vraie grandeur)
P1-P2	17% gain mécanique	22 % gain mécanique
P2-P3	16% gain physico-chimique	21 % gain physico-chimique
P1-P3	30% gain total	43% gain total

Tableau IV.1

Accroissement du moment de rupture Mr %		
	Poutres "A" (modèles réduits	Poutres "B" (vraie grandeur)
P1-P2	9% gain mécanique	5% gain mécanique
P2-P3	12 % gain physico-chimique	5 % gain physico-chimique
P1-P3	21% gain total	10% gain total

Tableau IV.2.

CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

Le principal objectif de cette étude était de mettre en évidence le rôle joué par la céramique dans le comportement en flexion pure des linteaux composites céramique-béton armé.

Nous avons choisi de mener cette étude en comparant systématiquement les déformations, les courbures, les flèches, les limites de réversibilité, les moments de service et les moments de rupture de trois poutres P1, P2 et P3 dont nous avons fait varier les caractéristiques de fabrication et (ou) de constitution de manière à isoler les différents paramètres susceptibles d'entrer en jeu. Les essais effectués ont porté sur deux types de séries de poutres P1, P2 et P3. Le premier type concernait des poutres à échelle réduite pour permettre d'effectuer un grand nombre d'essais tandis que le second portait sur des linteaux en vraie grandeur afin de vérifier si les résultats obtenus à petite échelle se retrouvent à grande échelle.

Dans chacune des deux catégories précitées nous avons procédé au calcul théorique du moment de rupture du linteau composité P1 par la formule proposée par la B.C.R.A. *

Nous avons donné dans le premier chamitre la description détaillée de la procédure expérimentale utilisée en précisant les caractéristiques des pièces d'essai, des modes d'application des charges et des techniques de mesure. Le second chapitre a été consacré à l'exposé des résultats relatifs au premier type de séries

---

* B.C.R.A. British Ceramic Research Association

de poutres : poutres "A" ou modèles réduits.
Au troisième chapitre, nous avons procédé à la vérification des résultats du deuxième chapitre (modèles réduits) sur des poutres (ou linteaux) en "vraie grandeur" : poutres "B".

Enfin au quatrième chapitre nous avons procédé à l'interprétation des phénomènes observés dans les deux chapitres précédents en dégageant les différentes composantes du rôle de la céramique.

Les résultats obtenus ont montré que la présence de la céramique se caractérise par une augmentation des performances mécaniques du linteau auquel elle est associée et ceci aussi bien vis-à-vis de l'état de service que vis-à-vis de la rupture. Ce phénomène se retrouve dans le cas des poutres "A". (modèles réduits) comme dans celui des poutres "B" (vraie grandeur).

Nous avons pu également montré que le rôle de la céramique est la résultante de deux composantes qui sont :

- une composante mécanique (mise en évidence par la comparaison de P1 et P2) et ;
- une composante physico chimique (mise en évidence par la comparaison de P2 et P3.

Enfin, nous avons montré que la formule de calcul proposée par la B.C.R.A. (4) moyennant quelque aménagement, permet de prédire le moment de rupture du linteau composite avec une précision satisfaisante.

Autorisation de Soutenance accordée
Toulouse le 13/6/1983
Le Directeur
Institut National des Sciences Appliquées

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

(1) M. GRILO
"Maçonnerie armée de brique creuse en terre cuite, compression axiale"
Rilem Janvier Février-1979 n° 67

(2) SVEN SAHLIN
"Structutal Masonry
Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.

(3) O. PFEFFERMANN - P. BATY
"Maçonnerie armée"

(4) "Design guide for reinforced and Prestressed clay Brickwork
The British ceramic Research Association : B.C.R.A.

(5) JACQUES GRANDET
"Contribution à l'étude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact des matériaux poreux"
Thèse I.N.S.A.

(6) J. GRANDET, R. JAVELAS, B. PERRIN, B. THENOZ
"Rôle de l'ettringite dans la liaison de type mécanique entre la terre cuite et la pâte de ciment portland"

(7) R. SUHUD
"Contribution à l'étude du comportement des poutres armées précontraintes par fils adhérents sous chargement direct"
Thèse I.N.S.A

(8) G. DREUX
"Guide pratique du béton"
Edition Eyrolles

(9) J.C. Maldague
"Détermination expérimentale des lois moment - courbure des poutres en béton armé"
Annales ITBTP série Béton, Béton armé n° 209, Mai 1965

(10) M. PINGLOT
"Contribution à l'étude de la rupture et des déformations des poutres partiellement précontraintes (2ème mémoire)"
Thèse I.N.S.A. Toulouse

(11) M. ALBIGES, M. MINGASSON
"Théorie et pratique du béton armé aux états limites"
Edit. Eyrolles

(12) M. ARNAUD, A. DURMUS, M. LORRAIN : I.N.S.A. Toulouse
"Le rôle des effets transversaux dans la flexion des planchers nervurés en béton armé : conséquences sur la sécurité"
Annales I.T.B.T.P. Série Essais et Mesures, N° 173.

(13) J.L. GALLIAS
"Mouvements d'eau et hydratation du liant dans une couche mince de mortier. Application aux enduits extérieurs"
Thèse I.N.S.A. Toulouse.

(14) F. CHEONG SIAT MOY, L. TALL
"Load Bearing Masonry Walls Analysed as Beam Columns"
Revues AIPC

(15) A.G.EVANS
"Structural reliability : a processing dependant phenomenon"
Journal of the American Ceramic society March 1982.

(16) HAMID AND DRYSDALE
"Suggested failure criteria for grouted concrete Masonry under axial compression"
Journal ACI

(17)LOAD BEARING BRICKWORK"
Proceedings of the British Ceramic Society n° 27, December 1978.

(18) BOULT
"Concrete Masonry Prism Testing"
Journal ACI Avril 1979 n°4

(19) H. HERBESSON, MAX BOUERY, J. CLAUSON
"Caractéristiques, emploi et mise en oeuvre des produits de terre cuite de bâtiment"
C.T.T.B. U.N.M.

(20) A. CHIRATTIYANGKUR
"Contribution à l'étude de la réversibilité et de la fissuration des poutres en béton armé sollicitées en flexion pure"
Thèse I.N.S.A. Toulouse

(21) A. FUENTES
"Le béton armé après fissuration"
Edition Eyrolles

(22) J.P. JACCOUD, R. FAVRE
"Flèche des structures en béton armé. Vérification expérimentale d'une méthode de calcul"
A.F.B. N° 194. Juillet Août 1982

(23) CEB -FIP Juin 1970
"Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton"

(24) "Règles de calcul du béton armé aux états limites"
B.A.E.L. 1979, S.N.B.A.T.I.

(25) KEITH E. LESLIE, K.S. RAJAGOPALAN AND N.J. EVERARD
"Flexural Behaviour of high strenght concrete Beams"
Journal ACI Septembre 1976 n°9

(26) COULIBALY
"Etude de la résistance en flexion d'un linteau composite céramique béton armé. Rôle et comportement de la céramique
Mémoire de D.E.A. Juin 1980. I.N.S.A.

(27) J.L. GRANJU, J.C. MASO, INSA Toulouse
"Résistance à la compression simple des pâtes pures de ciment durcies, temps de durcissement supérieur à quatre ans".
Pergamon Press, New York, Oxford, Toronto.

(28) B. COTTIN, P. REIF
"Paramètres physiques régissant les propriétés mécaniques des pâtes pures de liants alumineux" Cité dans (27)
Revue des matériaux de construction, Octobre 1970.

(29) E. RYSHKEWITCH
"Compression strength of porous sintered alumina and zirconia
cité dans (27)
Journal of American Ceramic Society, 36, n° 2, (1953)

(30) J.C. MASO
"La nature minéralogique des granulats, facteur essentiel
de la résistance des bétons à la rupture et à l'action du gel"
Thèse Université Paul Sabatier 1967.